

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

2016

Bc. Dalibor Brunclík

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského  
inženýrství

Testování vlastností elektroměrů a wattrouterů  
Tests of Electricity Meter Features

2016

Bc. Dalibor Brunclík

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Dalibor Brunclík**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma: **Testování vlastností elektroměrů a wattrouterů**  
**Tests of Electricity Meter Features**

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Elektroměry jsou v dnešní době vystavovány takovým podmínkám, kdy jejich chování není obvyklé. Jedná se o situace, kdy napětí a proud obsahují vysoké zastoupení harmonických složek, případně kdy dochází k rychlým změnám směru toku elektrické energie. Diplomová práce se zabývá testováním tzv. statických elektroměrů za výše uvedených podmínek, které způsobuje zařízení nazývané Wattrouter a shrnutím dopadů.

### Body zadání:

- 1) Seznámení se s problematikou měření elektrických výkonů a energie, s vlastnostmi statických elektroměrů a s principem funkce tzv. Wattrouteru.
- 2) Seznámení se se zdrojem testovacích signálů, jeho funkce, ovládání, programování.
- 3) Stanovení očekávaných kritických stavů signálů a návrh jejich realizace.
- 4) Implementace SW pro ovládání zdroje signálů a realizace sady testů.
- 5) Ověření funkčnosti aplikace, zhodnocení použité technologie, shrnutí výsledů.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRESS, Thomas J. *Effective labview programming*. 1st ed. Allendale: NTS Press, 2013, 701 s. ISBN 19-348-9108-8.
- [2] ČSN EN 61000-4-15 ed.2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC): Část 4-15: Zkušební a měřicí technika – Flickmetr – Specifikace funkce a dimenzování*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [3] ČSN EN 60050-131:2005. *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Část 131: Teorie obvodů*. Angl. originál viz [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)
- [4] EN 50470-1:2007. *Electricity metering equipment (a.c.) - Part 1: General requirements, tests and test conditions - Metering equipment (class indexes A, B and C)*. Brussel: CENELEC, 2007.
- [5] EN 50470-3:2007. *Electricity metering equipment (a.c.). Part 3: Particular requirements. Static meters for active energy (class indexes A, B and C)*. Brussel: CENELEC, 2007.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



---

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*



---

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Petru Bilíkovi, Ph.D. za praktickou pomoc a odborné vedení při vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině, která mi umožnila studium na vysoké škole a podporovala mě během studií.

V Ostravě dne 29. 4. 2016



---

Bc. Dalibor Brunclík

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá dopadem nestandardních podmínek v elektrické síti na vyhodnocení elektrické energie statickými elektroměry. Jedná se především o vysoký obsah harmonických v průběhu proudu a napětí a o rychlé změny mezi dodávkou elektrické energie do distribuční soustavy a odběrem elektrické energie z distribuční soustavy. Tyto rychlé změny způsobují zařízení zvané wattroutery. Wattroutery slouží k regulaci přebytků energie v objektech s fotovoltaickou elektrárnou. Diplomová práce se rovněž zabývá testováním konkrétního typu wattrouteru Greenbono a jeho vlivem na distribuční soustavu z hlediska flickru.

## Klíčová slova

Statický elektroměr, wattrouter, Greenbono, fotovoltaická elektrárna, měření, výkon, energie, napětí, proud, flickr, harmonické složky, regulace, dodávka energie, odběr energie, virtuální instrumentace, LabVIEW, přístrojový ovladač, CMC 256plus.

## Abstract

This thesis examines the impact of abnormal conditions in the power grid to influence the measurement of electricity meters. This is essentially a high harmonic content in the current and voltage waveform and rapid changes between the electricity supply and electricity consumption to the power grid. These rapid changes cause a device called wattrouters. They serve to regulate the surplus energy in homes with own photovoltaic power plant. This thesis also deals with testing a particular type wattrouter Greenbono and its impact on the power grid in terms of flicker.

## Key words

Electricity meter, wattrouter, Greenbono, photovoltaic plant, measurement, power, energy, voltage, current, flicker, harmonics, regulation, energy supply, energy consumption, virtual instrumentation, LabVIEW, instrument driver, CMC 256plus.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	8
Seznam ilustrací .....	10
Seznam tabulek .....	12
Úvod .....	13
1. Měření spotřeby elektrické energie statickými elektroměry .....	14
1.1 Popis statických elektroměrů .....	14
1.2 Dělení elektroměrů .....	15
1.3 Lokální a dálkový odečet .....	17
2. Wattroutery a jejich funkce .....	18
2.1 Způsob regulace .....	19
2.2 Vznik flikru a souvislost s činností wattrouteru .....	21
3. Přehled provedených testů a jejich cílů .....	23
3.1 Stavby signálů, které mohou negativně ovlivnit měření elektroměru .....	23
3.1.1 Harmonické složky .....	23
3.1.2 Rychlé změny mezi režimem dodávky a odběru energie .....	24
3.2 Testy wattrouteru .....	24
3.2.1 Ověření způsobu regulace wattrouteru .....	24
3.2.2 Měření flikru při regulaci wattrouteru .....	24
3.2.3 Simulovaný test flikru způsobeného wattrouterem .....	24
4. Kalibrátor CMC 256plus .....	25
4.1 Periférie a jejich vlastnosti .....	25
4.2 Možnosti ovládání přes Test Universe .....	25
4.2.1 Modul „QuickCMC“ .....	25
4.2.2 Modul „Meter“ .....	26
4.2.3 Modul „Harmonics“ .....	27
5. Virtuální instrumentace a dálkové ovládání přístrojů .....	28
5.1 Úvod do virtuální instrumentace .....	28
5.2 Vývojové prostředí LabVIEW .....	29
5.3 Dálkové ovládání přístrojů z LabVIEW, instrument drivers .....	30
5.4 Možnost ovládání kalibrátoru CMC 256plus z LabVIEW .....	31
6. Implementace a provedení testů na statických EM .....	33
6.1 Testování vysokého obsahu harmonických na přesnost elektroměrů .....	33
6.1.1 Test č. 1 Harmonické složky jen na fázi L1 .....	34

6.1.2	Test č. 2 Harmonické složky stejné na všech fázích .....	35
6.1.3	Test č. 3 Harmonické složky různé na všech fázích.....	36
6.2	Simulace chování EM při rychlém střídání dodávky a odběru energie.....	37
6.3	Automatizované ověření délky Tw elektroměru za pomoci odečtu registrů přes IR hlavu ..	38
6.3.1	Protokol komunikace s elektroměrem přes IR port.....	42
6.3.2	Výsledky testů z oblasti délky Tw .....	42
6.4	Testování chování metrologické LED a impulzních výstupů v případě rychlého přepínání mezi odběrem a dodávkou.....	43
7.	Testování funkce WR Greenbono a jeho vlivu na flickr v síti.....	49
7.1	Popis chování wattrouteru Greenbono .....	49
7.2	Testování dopadů Greenbona na flickr .....	54
7.2.1	Testování regulace pouze pomocí relé výstupů K1 – K5.....	55
7.2.2	Testování regulace pouze pomocí PWM výstupů pro řízení SSR.....	60
7.3	Simulovaný test vlivu WR na flickr v síti.....	64
Závěr .....		72
Literatura .....		74
Seznam příloh.....		76



## Seznam použitých symbolů a zkratek

$A_p$	celková činná energie (Ws)
$A_{p+}$	kladná činná energie, označuje odběr energie z distribuční soustavy (Ws)
$A_{p-}$	záporná činná energie, označuje dodávku energie do distribuční soustavy (Ws)
cRIO	modulární platforma od NI pro měření
$D$	střída (-), (%)
$E$	energie (Ws)
EM	elektroměr
FVE	fotovoltaická elektrárna
$f$	frekvence (Hz)
$f_{vz}$	vzorkovací frekvence (Hz)
HW	hardware
$I$	elektrický proud (A)
$I_Z$	proud odebíraný zapnutou zátěží (A)
$i$	počet naměřených pulzů na EM (-)
IR	infračervené světlo
$K_{EM}$	impulzní konstanta elektroměru, energie potřebná k vygenerování jednoho pulzu (Wh)
L1	fáze 1 elektrické sítě
L2	fáze 2 elektrické sítě
L3	fáze 3 elektrické sítě
NI	společnost National Instruments
$P$	výkon (W)
$P_{DS}$	výkon odebíraný z distribuční sítě (W)
$P_{FVE}$	výkon produkovaný FVE (W)
$P_Z$	výkon odebíraný zátěží (W)
$P_{inst}$	okamžitý flickr (-)
$P_{st}$	krátkodobý flickr, (-)
$P_{lt}$	dlouhodobý flickr (-)
PQA	analýzátor kvality elektrické energie
PWM	pulzně šířková modulace
$R$	elektrický odpor ( $\Omega$ )
SW	software
$T$	perioda (s)
$T_O$	doba odběru energie z distribuční soustavy (s)
$T_D$	doba dodávky energie do distribuční soustavy (s)
$T_p$	perioda změn dodávky a odběru energie, součet $T_O + T_D$ (s)
THD <sub>U</sub>	celkové harmonické zkreslení napětí (%)
THD <sub>I</sub>	celkové harmonické zkreslení proudu (%)
Tw	časové okno statického elektroměru
$t_{ON}$	doba po kterou je řízená zátěž zapnuta (s)
$t_{OFF}$	doba po kterou je řízená zátěž vypnuta (s)
$U$	elektrické napětí (V)
$U_{D\_ON}$	napětí v domácí síti při zapnuté zátěži (V)

$U_{D\_OFF}$	napětí v domácí síti při vypnuté zátěži (V)
$U_N$	nominální napětí 230 V
$U_V$	úbytek na zkratové impedanci elektrického vedení (V)
$U_{V\_ON}$	úbytek napětí na zkratové impedanci při zapnuté zátěži (V)
$U_{V\_OFF}$	přepětí na zkratové impedanci při vypnuté zátěži způsobené vlivem FVE (V)
WR	watrouter
$Z_K$	zkratová impedance ( $\Omega$ )

## Seznam ilustrací

Obr. 1 Příklady WR.....	18
Obr. 2 Blokové schéma zapojení, přejato z [6] .....	19
Obr. 3 Průběh výkonu a energie protékající přes EM v případě rychlé regulace prováděné WR.....	20
Obr. 4 Schéma elektrické sítě.....	21
Obr. 5 Ideální sinusový průběh proudu a napětí .....	23
Obr. 6 Průběh proudu a napětí běžný v praxi.....	23
Obr. 7 Kalibrátor CMC 256plus.....	25
Obr. 8 Uživatelské rozhraní modulu QuickCMC.....	26
Obr. 9 Uživatelské rozhraní modulu Meter.....	26
Obr. 10 Uživatelské rozhraní modulu Harmonics.....	27
Obr. 11 Komponenty virtuálního měřicího přístroje, přejato ze [14].....	29
Obr. 12 Příkladu čelního panelu v LabVIEW, přejato z [15].....	30
Obr. 13 Příkladu blokového diagramu v LabVIEW, přejato z [15] .....	30
Obr. 14 Ikona a konektor pro použití VI jako subVI v jiném kódu v LabVIEW, přejato z [15] .....	30
Obr. 15 Ukázka všech SW funkcí přístrojového ovladače pro CMC 256plus v LabVIEW .....	32
Obr. 16 EM Itron ACE3000 a ACTARIS ACE6000 .....	33
Obr. 17 Blokové schéma .....	34
Obr. 18 Čelní panel aplikace simulující chování statického EM při rychlých změnách toku výkonů..	37
Obr. 19 Blokové schéma .....	38
Obr. 20 Čelní panel aplikace pro testování časové délky $T_w$ EM4 .....	39
Obr. 21 Znázornění vztahů mezi pojmy stav, perioda a úloha.....	40
Obr. 22 Vývojový diagram řídicího programu v LabVIEW .....	41
Obr. 23 Schéma experimentálně zjištěného chování elektroměru .....	46
Obr. 24 Energie v závislosti na čase, trvalý odběr .....	47
Obr. 25 Energie v závislosti na čase, pomalé střídání mezi odběrem a dodávkou energie .....	47
Obr. 26 Energie v závislosti na čase, rychlé střídání mezi odběrem a dodávkou energie.....	48
Obr. 27 WR Greenbono .....	49
Obr. 28 Interface aplikace dodávané výrobcem WR .....	50
Obr. 29 Zařízení cDAQ a proudové klěště.....	50
Obr. 30 Čelní panel aplikace pro testování funkce WR s vyznačenými oblastmi A, B, C, D .....	51
Obr. 31 snímek z aplikace Greenbono HMI, nárůst střidyPWM .....	52
Obr. 32 snímek z aplikace Greenbono HMI, zapínání relé .....	52
Obr. 33 snímek z aplikace Greenbono HMI, snižování střidy PWM.....	52
Obr. 34 snímek z aplikace Greenbono HMI, vypínání relé.....	53
Obr. 35 PWM výstup WR při střídě 50% .....	53
Obr. 36 Porovnání závislostí stříd PWM výstupů na době přetékání energie do distribuční soustavy .	54
Obr. 37 Schéma propojení jednotlivých prvků, při testování WR s možností využití virtuální instrumentace .....	55
Obr. 38 Čelní panel aplikace s vyznačenými oblastmi A, B, C, D .....	55
Obr. 39 Část čelního panelu čtečky.....	57
Obr. 40 Průběh spínání zátěží na L1 přes relé K1 a K2 .....	58
Obr. 41 Průběh spínání zátěže na L2 přes relé K3 .....	58

Obr. 42 Průběh spínání zátěží na L3 přes relé K4 a K5 .....	58
Obr. 43 Všechny fáze dohromady, relé K1 – K5 .....	58
Obr. 44 Průběh výkonu v dané fázi v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného $U$ a $I$ v každé fázi) .....	59
Obr. 45 Průběh celkové energie v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného $P$ ; odebíraná energie se přičítá, dodávaná energie do distribuční sítě se odečítá) .....	59
Obr. 46 Průběh energie odebírané z distribuční soustavy v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného $P$ , poslední hodnota by měla odpovídat údajům $A_{p+}$ naměřenému EM).....	59
Obr. 47 Průběh energie dodávané do distribuční soustavy v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného $P$ , poslední hodnota by měla odpovídat údajům $A_p$ naměřenému EM).....	59
Obr. 48 Průběh napětí v domácnosti v závislosti na čase .....	60
Obr. 49 Čelní panel aplikace .....	60
Obr. 50 Čelní panel čtečky dat pro testy z oblasti WR regulace přes PWM.....	61
Obr. 51 Průběh střidy PWM výstupů, které řídí spínání zátěží, každé PWM reguluje výkon ve své fázi .....	62
Obr. 52 Průběh výkonu v dané fázi v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného $U$ a $I$ v každé fázi) .....	62
Obr. 53 Průběh celkové energie v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného $P$ ; odebíraná energie se přičítá, dodávaná energie do distribuční sítě se odečítá) .....	63
Obr. 54 Průběh energie odebírané z distribuční soustavy v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného $P$ , poslední hodnota by měla odpovídat údajům $A_{p+}$ naměřenému EM).....	63
Obr. 55 Průběh energie dodávané do distribuční soustavy v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného $P$ , poslední hodnota by měla odpovídat údajům $A_p$ naměřenému EM).....	63
Obr. 56 Průběh okamžitého flikru v domácnosti v závislosti na čase.....	63
Obr. 57 Závislost periody na střídě .....	65
Obr. 58 Závislost periody na střídě detail .....	65
Obr. 59 Signál z PWM výstupu WR s vyznačením časů $t_{ON}$ a $t_{OFF}$ .....	65
Obr. 60 Signál z PWM výstupu WR, střída je 25%, $T = 80$ ms .....	66
Obr. 61 Signál z PWM výstupu WR, střída je 50%, $T = 40$ ms .....	66
Obr. 62 Signál z PWM výstupu WR, střída je 75%, $T = 80$ ms .....	66
Obr. 63 Část čelního panelu aplikace.....	67
Obr. 64 Závislost $U_{D\_ON}$ , $U_{D\_OFF}$ , a $\Delta U$ na střídě .....	69
Obr. 65 Závislost flikru na střídě spínání PWM výstupu WR Greenbono, $Z_K = 0,1 \Omega$ .....	69
Obr. 66 Závislost flikru na střídě spínání PWM výstupu WR Greenbono, $Z_K = 0,2 \Omega$ .....	70
Obr. 67 Závislost flikru na střídě spínání PWM výstupu WR Greenbono, $Z_K = 0,5 \Omega$ .....	70

## Seznam tabulek

Tab. 1 Klasický Ferraris .....	16
Tab. 2 Ferraris se „zákloučkou“ (ochrana proti zpětnému chodu).....	16
Tab. 3 Součet absolutních hodnot (u běžných domácností) .....	16
Tab. 4 Součet jen kladných nebo záporných hodnot energie .....	16
Tab. 5 Převládající odběr nebo dodávka energie .....	16
Tab. 6 Harmonické složky napětí ve fázi L1, $U_N = 230$ V (k této hodnotě se vztahují procentuální hodnoty), $U_{RMS} = 239,91$ V, $THD_U = 2,33\%$ .....	35
Tab. 7 Harmonické složky proudu ve fázi L1. $I_{RMS} = 4,463$ A, $THD_I = 114\%$ .....	35
Tab. 8 Výsledky testu.....	35
Tab. 9 Harmonické složky napětí ve všech fázích, $U_n = 230$ V (k této hodnotě se vztahují procentuální hodnoty), $U_{RMS} = 240,52$ V, $THD_U = 2,33\%$ .....	35
Tab. 10 Harmonické složky proudu ve všech fázích. $I_{RMS} = 4,463$ A, $THD_I = 114\%$ .....	35
Tab. 11 Výsledky testu.....	35
Tab. 12 Harmonické složky napětí ve všech fázích, $U_n = 230$ V (k této hodnotě se vztahují procentuální hodnoty) .....	36
Tab. 13 Harmonické složky proudu v každé fázi jiné .....	36
Tab. 14 Výsledky testu.....	36
Tab. 15 Časová sekvence stavů v domácí síti .....	56
Tab. 16 sekvence stavů (záporný proud – představuje dodávku energie, kladný proud – představuje odběr energie z distribuční soustavy).....	57
Tab. 17 Velikost spotřeby proudu virtuálních zátěží spínaných přes relé WR .....	57
Tab. 18 Sekvence stavů (záporný proud – představuje dodávku energie, kladný proud – představuje odběr energie z distribuční soustavy) .....	61
Tab. 19 Velikost spotřeby proudu virtuálních zátěží spínaných jednotlivými PWM výstupy WR přes SSR.....	61

## Úvod

V dnešní době jsou statické elektroměry (dále v textu jen EM), měřící spotřebu elektrické energie, v praxi vystaveny nepříznivým podmínkám z hlediska parametrů měřených signálů. Měřenými signály jsou okamžité hodnoty proudu a napětí. Na jejich základě EM stanoví množství spotřebované či dodané elektrické energie v měřeném objektu.

Podle teoretických předpokladů by napětí v síti mělo mít frekvenci 50 Hz, efektivní hodnotu 230 V a sinusový průběh bez harmonických složek. Odebíraný proud by měl být v ideálním případě rovněž sinusový průběh bez harmonických složek. V praxi však není možné ideální podmínky dodržet. Frekvence a velikost napětí v distribuční soustavě kolísá obvykle v rámci povolené tolerance. Průběh napětí rovněž obsahuje spektrum harmonických složek, které deformují jeho tvar. Průběh proudu protékajícího elektroměrem závisí na typu zátěže, která je v domácnosti právě v provozu. V dnešní době se hojně používají spínané zdroje a elektronicky řízené zátěže, které mohou odebírat proud jen po určitou část periody napájecího napětí. Následkem je velký obsah harmonických v průběhu proudu a potažmo i napětí díky úbytku napětí na zkratové impedanci sítě.

Dalším nepříznivým vlivem na přesnost měření EM je rychlé přepínání mezi odběrem elektrické energie z distribuční soustavy a dodávkou elektrické energie do distribuční soustavy. Tento problém se týká objektů s vlastním zdrojem elektrické energie, nejčastěji s fotovoltaickou elektrárnou (dále v textu jen FVE). Tyto objekty mohou používat zařízení určené k regulaci přebytků vlastní energie, tzv. wattroutery (dále v textu jen WR). WR může způsobovat velmi rychlé změny mezi dodávkou a odběrem energie z distribuční soustavy až s periodou 40 ms. To znamená, že po dobu jedné periody síťového napětí (20 ms) dochází k odběru energie z distribuční soustavy a po dobu druhé periody dochází k dodávce energie do distribuční soustavy. Tento proces se stále opakuje.

Diplomová práce se zabývá vlivem výše popsaných nepříznivých podmínek na přesnost měření statických EM. Zabývá se také zkoumáním funkce samotného WR. Dále obsahuje návrh testovacích algoritmů pro EM a WR s využitím prostředků virtuální instrumentace, jejich implementaci a výsledky testů.

# 1. Měření spotřeby elektrické energie statickými elektroměry

Základním úkolem měření spotřeby elektrické energie je konkrétním způsobem získávat data o odebrané a dodávané elektrické energii a takto pořízena data dále poskytovat oprávněným účastníkům trhu s elektřinou [1].

Dle § 4 zákona č. 458/2000 Sb. V platném znění zajišťuje měření, kterým se zjišťuje množství dodané nebo odebrané činné nebo jalové elektrické energii a jeho časový průběh v distribuční soustavě, příslušný provozovatel distribuční soustavy, který rovněž odpovídá za funkčnost a správnost měřicího zařízení.

V této kapitole bude následovat stručný popis EM, jejich funkce a způsobu zpracování dat. Dále bude následovat jejich dělení a způsob jejich odečtu.

## 1.1 Popis statických elektroměrů

Statické EM slouží k stanovení množství spotřebované energie z distribuční soustavy, případně ke stanovení množství dodané energie do distribuční soustavy, v objektech s vlastním zdrojem elektrické energie. Jsou připojeny na vedení distribuční soustavy a za nimi obvykle následuje rozvodná skříň. Z té je dále rozveden přívod elektrické energie do celého objektu.

Starší elektroměry (tzv. systém Ferraris) prováděly měření elektrické energie analogově [2]. Základem těchto elektroměrů byl rotující kovový disk, na který působila dvě fázově posunutá magnetická pole, která vytvářela rotující magnetické pole. Rotující magnetické pole otáčelo kovovým diskem, který byl zároveň brzděn magnetickou brzdou, jejíž brzdový moment závisel na měřeném rozsahu. Rotace kovového disku poháněla mechanický číselník, který zaznamenával množství odebrané energie.

Dnes jsou nasazovány již statické (digitální) elektroměry. Ty provádějí digitalizaci měřeného průběhu proudu a napětí. Z těchto hodnot za určitý časový okamžik stanovují aktuální průměrnou spotřebu elektrické energie, viz další popis.

Základem statických EM je měření okamžitého napětí a proudu. Z těchto hodnot se určí hodnota okamžitého činného výkonu odebíraného z distribuční soustavy. Obecný vztah pro stanovení okamžitého výkonu z hodnot proudu a napětí je následující

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1)$$

Spotřebovaná elektrická energie závisí na době odebírání výkonu a na jeho velikosti v čase

$$E = \int_0^T p(t) dt \quad (2)$$

Statické elektroměry ovšem pracují s diskrétními hodnotami, proto se jejich měření energie částečně liší. V pravidelném taktu vzorkovací frekvence se pořizují okamžité hodnoty proudu a napětí, z těch se stanovuje okamžitý výkon.

$$p(n) = u(n) \cdot i(n) \quad (3)$$

Statický elektroměr měří okamžitý činný výkon po určitý časový úsek nazývaný časové okno (anglicky Time window, dále jen  $T_w$ ), které může mít různou délku. Délka  $T_w$  je dána výrobcem elektroměru a závisí na počtu naměřených vzorků  $N$  a vzorkovací frekvenci  $f_{vz}$ .

$$T_w = \frac{N}{f_{vz}} \quad (4)$$

Po dosažení požadovaného času se provede výpočet střední hodnoty činného výkonu.

$$P = \frac{1}{N} \sum_0^N p(n) \quad (5)$$

Ze střední hodnoty činného výkonu se vypočítá hodnota energie za dobu  $T_w$ .

$$E = P \cdot T_w \quad (6)$$

Tato hodnota se přičte ke stávající hodnotě energie v paměťovém registru a zobrazí na displeji elektroměru.

Číslicový způsob zpracování měřených signálů umožňuje digitálním elektroměrům měřit a uchovávat v paměti celou řadu dalších parametrů, jak co se týče kvality napájecího napětí, tak co se týče odebírané energie. Často měří navíc např. zdánlivý výkon, jalový výkon, čtvrt hodinové maxima, maximální zaznamenaný výkon po dobu měření, maximální výchylky napájecího napětí atd.

Měření digitálními elektroměry je ale zatíženo nedokonalostí v podobě  $T_w$  nenulové délky. Jaké to může mít následky na měření energie, bude rozebráno dále.

## 1.2 Dělení elektroměrů

Výše již bylo uvedeno základní rozdělení EM na analogové a statické (digitální). Z pohledu průchodu elektrické energie se EM dělí do dvou skupin [1]:

- 1) **EM s přímým měřením.** Veškerá měřená energie prochází přímo EM. Používají se, pokud odebíraný proud dosahuje trvale hodnoty do 80 A, případně do 100 A
- 2) **EM s nepřímým (převodovým) měřením.** Měřená energie prochází měřicími transformátory. V síti nízkého napětí se používají jen proudové měřicí transformátory.

Dále je možno EM rozdělit z hlediska toku energie:

- 1) Jedno-kvadrantní EM
- 2) Čtyř-kvadrantní EM

**Jedno-kvadrantní EM** se používají v objektech bez vlastního zdroje elektrické energie. S těmi se v praxi setkáme nejčastěji. Každá ze tří fází je měřena zvlášť. Po navzorkování napětového a proudového signálu každého  $T_w$  se vypočtou hodnoty toku energie v každé fázi. Potom přichází na řadu součtový algoritmus, který může být různý. Níže jsou v tabulkách uvedeny konkrétní příklady některých součtových algoritmů.



Poznámka: znaménko „+“ znamená odebranou energii z distribuční soustavy a znaménko „-“, znamená dodanou energii do distribuční soustavy. Velikosti energií + a – je stejná.

**Tab. 1 Klasický Ferraris**

L1	L2	L3	Výsledek
+1	+1	+1	+3
+1	-1	+1	+1
+1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-3

**Tab. 2 Ferraris se „záklopkou“ (ochrana proti zpětnému chodu)**

L1	L2	L3	Výsledek
+1	+1	+1	+3
+1	-1	+1	+1
+1	-1	-1	0
-1	-1	-1	0

**Tab. 3 Součet absolutních hodnot (u běžných domácností)**

L1	L2	L3	Výsledek
+1	+1	+1	+3
+1	-1	+1	+3
+1	-1	-1	+3
-1	-1	-1	+3

Nosnou myšlenkou tohoto principu je, že standardní zákazník nemá dovoleno dodávat energii do distribuční sítě. Navíc se tím eliminují chyby v zapojení (prohození vstupu a výstupu jednotlivé fáze).

**Tab. 4 Součet jen kladných nebo záporných hodnot energie**

L1	L2	L3	Výsledek kladné	Výsledek záporné
+1	+1	+1	+3	0
+1	-1	+1	+2	-1
+1	-1	-1	+1	-2
-1	-1	-1	0	-3

**Tab. 5 Převládající odběr nebo dodávka energie**

L1	L2	L3	Výsledek kladné	Výsledek záporné
+1	+1	+1	+3	0
+1	-1	+1	+2	0
+1	-1	-1	0	-2
-1	-1	-1	0	-3

Méně často se lze setkat i s **čtyř-kvadrantními EM**, které se používají v objektech s vlastním zdrojem elektrické energie. Tímto zdrojem jsou v rodinných domech nejčastěji solární panely. Proto musí být elektroměr schopen měřit jak množství energie, které rodinný dům odebírá z distribuční soustavy, tak množství energie které rodinný dům dodává do distribuční soustavy.

### 1.3 Lokální a dálkový odečet

Pro měření množství elektrické energie a vyhodnocení údajů ve smyslu vyhlášky Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO) č. 218/2001 Sb. se rozlišují a používají typy měření [1]:

- 1) Průběhová měření elektřiny s denním přenosem údajů – měření typu A
- 2) Průběhová měření elektřiny s jiným než denním přenosem údajů – měření typu B
- 3) Ostatní měření elektrické energie – měření typu C
- 4) Měření elektrické energie s dálkovým přenosem údajů mimo měření A, B – měření typu S
- 5) Měření činného výkonu svorkové výroby pro stanovení velikosti regulační energie – dispečerské měření

Průběhovým měřením se rozumí měření, které provádí průběžný záznam střední hodnoty výkonu za měřicí interval přímo měřicím zařízením. Měřicí interval je základní časový úsek pro měření střední hodnoty výkonu.

Měřením typu C se vybavují odběrná místa zákazníků, kde není technicky ani ekonomicky výhodné instalovat měření typu A, B nebo S. Prakticky se může jednat o odběrná místa zákazníků s napětím do 1 kV, s rezervovaným příkonem do 100 kW nebo s hlavním jistícím prvkem o jmenovitém proudu do 200 A. Tímto měřením mohou být také vybaveny předávací místa výrobců elektrické energie s instalovaným výkonem výroby do 30 kW.

Měřením typu S se vybavují odběrná místa zákazníků s odběrem elektrické energie z distribuční soustavy, (případně s vlastní výrobou elektrické energie s instalovaným výkonem výroby do 30 kW), kde není technicky ani ekonomicky výhodné instalovat měření typu A nebo B. Základní interval pro zpracování a přenos naměřených údajů v rámci měřicího zařízení je jeden měsíc.

## 2. Wattroutery a jejich funkce

Na území ČR stát podporuje výrobu elektrické energie z obnovitelných zdrojů. V rámci tohoto programu mají provozovatelé FVE dvě možnosti podpory. První možností je tzv. garantovaná výkupní cena [3]. Ta je fixovaná na 20 let s pravidelným ročním navýšením o (2 – 4)%. Energii je povinen odebrat jeden z hlavních distributorů elektrické energie (ČEZ, E.ON, PRE).

Druhou možností je tzv. zelený bonus [4]. Ten je fixován pouze na jeden rok. Jedná se o příspěvek k vyrobené elektrické energii, kterou si provozovatel elektrárny může spotřebovat sám nebo prodat třetímu subjektu za libovolnou cenu.

Pro provozovatele FVE [5], kteří nejsou zapojeni do programu s garantovanou výkupní cenou, je výhodné v maximálně možné míře spotřebovávat vlastní vyrobenou energii na místo odebrání energie z distribuční soustavy. Cena elektrické energie spotřebované z distribuční soustavy je totiž větší než výkupní cena energie vyrobené ve vlastní FVE. Z tohoto důvodu se majitelé FVE snaží svou vlastní energii spotřebovat ve svém objektu, aniž by ji dodali do distribuční soustavy za nízkou cenu a potom za vysokou cenu energii zpátky z distribuční soustavy dokupovali. Protože výkon FVE značně kolísá v závislosti na intenzitě slunečního záření, využívají tyto domácnosti k maximalizaci spotřeby vlastní vyrobené elektrické energie WR.

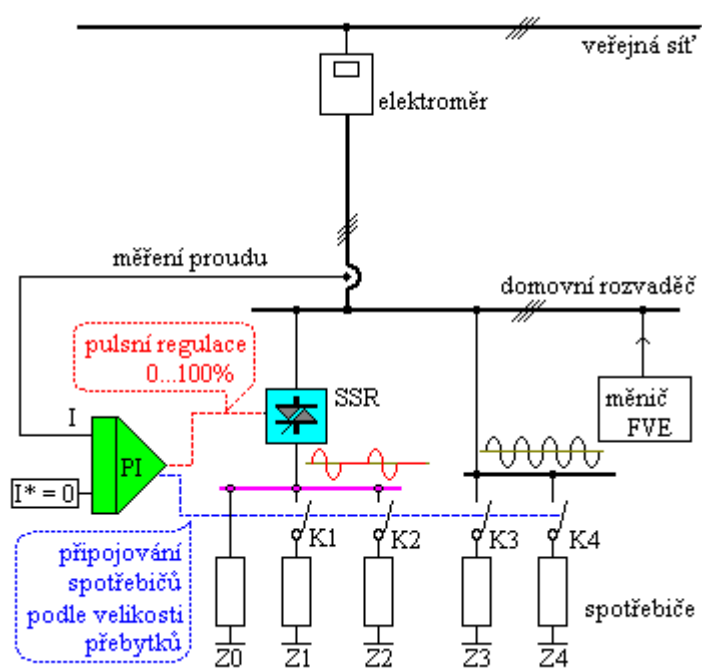


Obr. 1 Příklady WR

WR je určen k dosažení maximálního možného využití přebytků vlastní vyrobené elektrické energie v místech s FVE připojenou k distribuční soustavě. WR směřuje přebytky (tedy tu část vyrobené elektrické energie, která by přetekla do distribuční soustavy, protože v místě výroby pro ni v dané chvíli není využití) do spotřebičů se schopností akumulovat energii.

První výhodou při použití WR je tedy finanční úspora. Druhou výhodou je to, že se energie zbytečně nepřenáší v distribuční soustavě a nezpůsobuje přenosové ztráty, ale spotřebovává se přímo v místě výroby. To také vede k omezování přepětí v síti. Na druhou stranu může být WR zdrojem vzniku nežádoucího flikru.

Na obr. 2 je blokové schéma znázorňující způsob zapojení WR v domácí síti. Propojení mezi distribuční soustavou a objektem s vlastní FVE je vedeno přes EM. Za EM je připojen WR, který měří podobně jako EM napětí a proud. WR je na obrázku zastoupen jedním ze svých proporcionálně-integračních regulátorů (zelený blok). Na základě měřených hodnot napětí a proudu vyhodnocuje WR velikost výkonu a jeho směr (odběr/dodávka) a reguluje spínání řízených spotřebičů.



Obr. 2 Blokové schéma zapojení, přejato z [6]

## 2.1 Způsob regulace

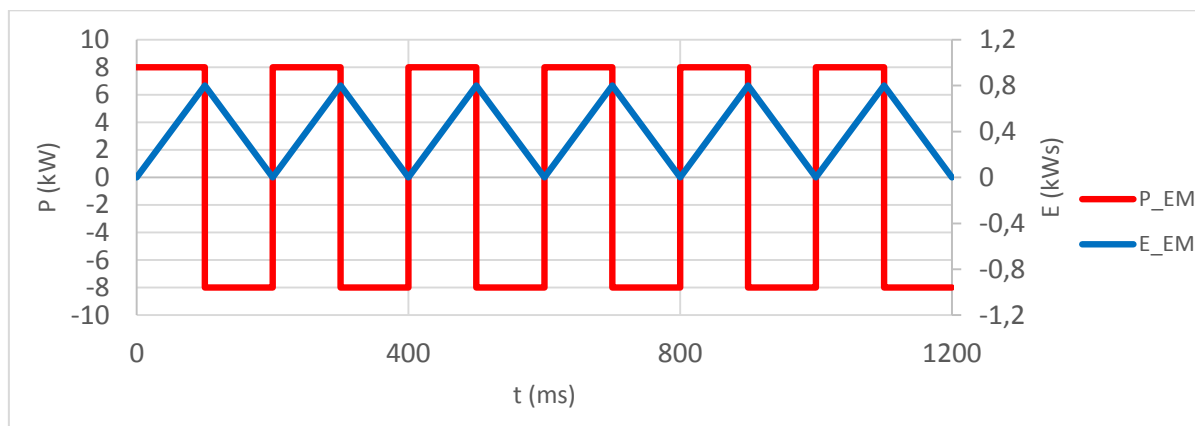
WR jsou schopny regulovat přebytky energie z FVE dvěma způsoby. Prvním způsobem, který byl nazván **pomalá regulace**, je sepnutí akumulčního spotřebiče (např. bojleru) v okamžiku, kdy okamžitý výrobní výkon FVE je větší než příkon akumulčního spotřebiče. Pak je tento spotřebič po celou dobu sepnutí napájen výhradně energií z FVE. V okamžiku kdy okamžitý výrobní výkon FVE klesne pod úroveň příkonu spotřebiče, je spotřebič vypnut. Jedná se o pomalou regulaci, která z hlediska elektroměru nepředstavuje problém, protože k spínání spotřebiče dochází v řádech minut či jednotkách hodin.

Větší problém představuje druhý způsob, který byl nazván **rychlá regulace**. Ten využívá nedokonalostí v podobě časového okna  $T_w$  nenulové délky. Tento způsob regulace probíhá v případě, že FVE vyrábí energii ale okamžitý výkon elektrárny je menší než příkon spínaného akumulčního spotřebiče. V tom případě dojde k sepnutí spotřebiče na krátký časový interval v řádu desítek milisekund. Během tohoto sepnutí spotřebič spotřebovává veškerý výkon z FVE a zároveň si zbytek příkonu odebere z distribuční soustavy. Poté je spotřebič vypnut a výkon z FVE je dodáván do distribuční soustavy, aby dodal energii, kterou spotřebič z distribuční soustavy odebral. Protože k tomuto zapínání a vypínání spotřebiče dochází velmi rychle (několikrát za sekundu) a vždy je v rámci  $T_w$  vráceno do distribuční soustavy tolik energie, kolik si spotřebič odebral, zaznamená elektroměr do svých paměťových registrů jen malé anebo vůbec žádné hodnoty odběru a dodávky energie. Tím že FVE vrátí spotřebovanou energii do distribuční soustavy v krátké době je střední hodnota toku výkonu za dobu  $T_w$  nulová.

Pro ilustraci lze uvést příklad. WR spíná akumulční spotřebič s příkonem 16 kW. FVE v daný okamžik vyrábí energii o výkonu 8 kW. WR sepne spotřebič na dobu 100 ms. Během této doby odebírá spotřebič celý výkon z FVE 8 kW a zbývající výkon 8 kW odebírá z distribuční soustavy. Během 100 ms odebere spotřebič z distribuční soustavy energii o hodnotě 0,8 kW. Poté je spotřebič

vypnut a výkon z FVE je dodáván do distribuční soustavy. Za dobu 100 ms dodá do distribuční soustavy FVE energii 0,8 kW.s, která byla z distribuční soustavy odebrána. Poté se celý děj periodicky opakuje.

Situaci dokresluje graf na obr. 3, který znázorňuje tok energie přes EM.



Obr. 3 Průběh výkonu a energie protékající přes EM v případě rychlé regulace prováděné WR

Poměr doby, po kterou je řízený spotřebič zapnut  $t_{ON}$  k době, po kterou je vypnut  $t_{OFF}$ , odpovídá poměru vyráběného výkonu FVE  $P_{FVE}$  k výkonu odebíranému z distribuční soustavy  $P_{DS}$  po dobu zapnutí spotřebiče. Výkon odebíraný z distribuční soustavy  $P_{DS}$  lze určit odečtením výkonu FVE  $P_{FVE}$  od příkonu zátěže  $P_Z$ .

$$\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} = \frac{P_{FVE}}{P_Z - P_{FVE}} = \frac{P_{FVE}}{P_{DS}} \quad (7)$$

Starší elektroměry měřily průměrnou hodnotu výkonu ze všech tří fází dohromady. Nové statické elektroměry vyhodnocují tok výkonu v každé fázi zvlášť. Rozdíl oproti předchozímu algoritmu je z technického řešení nepatrný - tři naměřené hodnoty na jednotlivých fázích se zde nesečtou do jediné sumární hodnoty, ale uloží se do tří samostatných akumulacních registrů a pak se také samostatně vyúčtují.

Tento nový typ čtyř-kvadrantního elektroměru vykazuje oproti předchozímu, který sčítal tři fáze, zásadní rozdíl: K vykázaní nulové bilance energie u tohoto elektroměru je nutné zajišťovat energetickou rovnováhu **v každém fázovém vodiči**. Nálepka s trojúhelníkem na elektroměru identifikuje měření každé fáze zvlášť. Od roku 2012 je nutno počítat s tím, že u každé nové FVE je elektroměr s tímto novým algoritmem.

Přechod na účtování podle nového algoritmu je pro distributory vždy výhodný, a pro majitele FVE je vždy nevýhodný. Ve srovnání se starým měřením zde dochází k omezení dosažitelné vlastní spotřeby. Regulace přebytků podle nových pravidel je technicky i finančně náročnější, než regulace podle původních pravidel: zdaleka již nestačí pouhá celková energetická rovnováha, ale musí být zajištěna energetická rovnováha v každé fázi. To s sebou přináší nutnost regulovat každou fázi samostatně, ale je nutno také zajistit pro každou fázi dostatek spotřebičů a přizpůsobit zapojení novým podmínkám. Také to vyžaduje, aby WR dokázal regulovat přebytky v každé fázi samostatně.

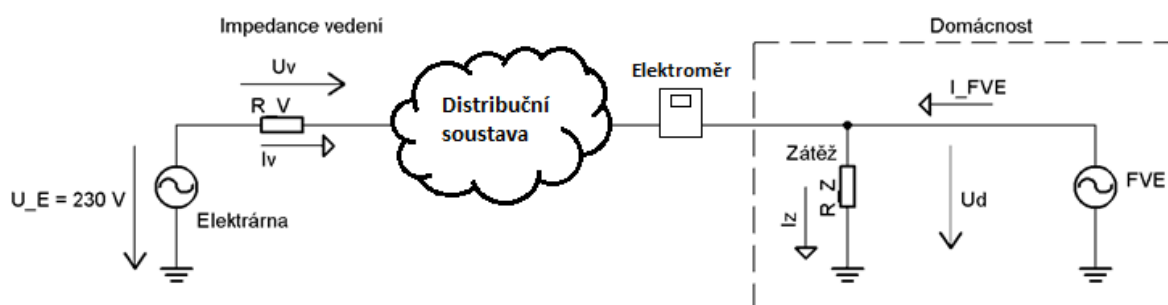
## 2.2 Vznik flikru a souvislost s činností wattrouteru

Flikr, neboli blikání, je nežádoucí jev označující viditelné změny v intenzitě světla elektrických světelných zdrojů, způsobené fluktuací napětí v distribuční soustavě [7]. Fluktuace napětí v distribuční soustavě je způsobena úbytky napětí, které se tvoří na zkratové impedanci vedení, vlivem protékajících proudů. Časté změny ve svítivosti osvětlení způsobené velkým flikrem napájecího napětí, mohou vyvolat u citlivějších osob bolesti hlavy, případně epileptické záchvaty. Flikr může mít rovněž nežádoucí účinky na správnou funkci citlivých elektronických zařízení.

Příčinou vzniku nežádoucího flikru může být i regulační proces WR, který zapíná a vypíná jednotlivé zátěže, aby zajistil co největší využití vlastní vyrobené energie v domácnosti. Časté spínání těchto spotřebičů způsobuje častou změnu proudů v distribuční soustavě a tím i fluktuaci napětí. Čím větší je příkon zátěže spínané přes WR a čím větší je zkratová impedance distribuční soustavy v místě spotřeby, tím větší je i způsobovaný flikr [8].

Mezní hodnoty flikru v distribuční soustavě jsou stanoveny normou. Norma ČSN EN 61000-4-15 [9], která je českou verzí normy EN 61000-4-15 stanovuje, jakým způsobem se má flikr měřit. Nejedná se totiž o klasickou fyzikální veličinu. Přístroje měřící flikr se skládají ze dvou základních částí. První část provádí modelování odezvy řetězce svítidlo-oko-mozek. Druhá část provádí statistickou analýzu signálu blikání v reálném čase a prezentaci výsledků.

Základní schéma pro pochopení vzniku flikru je na následujícím obrázku. Pro jednoduchost jsou v tomto příkladu uvažovány **pouze činné odpory** nikoli obecná impedance s kapacitním nebo induktivním charakterem.



Obr. 4 Schéma elektrické sítě

Na generátoru v elektrárně lze přepokládat konstantní napětí  $U_E = 230 \text{ V}$ .

Mezi elektrárnou a měřeným objektem je distribuční soustava (vedení, transformátory) se zkratovou impedancí sítě  $Z_K$ .  $Z_K$  způsobuje v případě protékání proudu úbytek napětí  $U_V$ , který je příčinou flikru. Pro názornost je uveden ilustrační příklad, kde  $Z_K$  je nahrazena pro zjednodušení činným odporem vedení  $R_V$ .

Odpor vedení má velikost  $R_V = 0,2 \Omega$ . Příkon zátěže (např. bojleru) je  $P_Z = 2 \text{ kW}$ . To v případě napájecího  $U_E = 230 \text{ V}$  představuje proud zátěží  $I_Z = 8,7 \text{ A}$ . (Veškeré proudy v tomto příkladu vypočítané z výkonů se vztahují k nominálnímu napětí  $230 \text{ V}$ , změny tohoto proudu v důsledku úbytků napětí způsobujících flikr byly zanedbány).

Z počátku FVE nevyrábí žádnou energii. V případě, že spotřebič není zapnut, neodebírá proud. To znamená, že  $I_Z = I_V = 0 \text{ A}$ . Protože neprotéká proud ani vedením, nevzniká na něm úbytek napětí,

tedy  $U_V = 0$  V. Z toho plyne, že celé napětí  $U_E$  je i na svorkách zásuvek v domácnosti,  $U_E = U_D = 230$  V. V případě, že spotřebič je zapnut, odebírá proud  $I_Z = I_V = 8,7$  A. Tento proud protéká rovněž distribuční soustavou, kde na zkratové impedanci způsobuje vznik úbytku napětí.

$$U_V = I_V \cdot R_V = 8,7 \cdot 0,2 = 1,74 \text{ V} \quad (8)$$

Z toho plyne, že na svorkách zásuvek v domácnosti už není celé  $U_E$ , ale je zmenšené o úbytek na přírodním vedení.

$$U_D = U_E - U_V = 230 - 1,74 = 228,26 \text{ V} \quad (9)$$

Při spínání spotřebiče tedy dochází ke změně velikosti napětí v domácnosti a tím i k flikru.

Po nějaké době začne FVE vyrábět elektrickou energii s polovičním výkonem, než je příkon spotřebiče  $R_Z$ . To znamená že  $P_{FVE} = 1$  kW, při 230V to odpovídá proudu  $I_{FVE} = 4,35$  A. V případě, že spotřebič není zapnut, neodebírání žádný proud. To znamená, že  $I_Z = 0$  A. Výkon z FVE začne přetékát do distribuční soustavy. Proud, který tento výkon přenáší, má stejnou velikost ale opačnou fází proti napětí, protože se jedná o dodávku energie.  $I_V = I_{FVE} = 4,35$  A. Tento proud protéká přírodním vedením, na kterém způsobuje vznik úbytku napětí tentokrát ale v opačném směru, čili přepětí.

$$U_V = I_V \cdot R_V = -4,35 \cdot 0,2 = -0,87 \text{ V} \quad (10)$$

Z toho vyplývá, že na svorkách zásuvek v domácnosti je celé  $U_E$ , navíc zvětšené o napětí na přírodním vedení.

$$U_D = U_E - U_V = 230 - (-0,87) = 230,87 \text{ V} \quad (11)$$

Tento vzrůst napětí v domácnosti je logický, protože aby mohl téct výkon z FVE do distribuční soustavy, musí být napětí FVE větší než napětí generátoru v elektrárně plus úbytek napětí na přírodním vedení. Tento závěr je ale spíše teoretický, protože v praxi by energie vyrobená domácí FVE zřejmě netekla přes celé vedení až ke generátoru, ale přetekla by jen do nejbližší domácnosti s momentální spotřebou. Tím by impedance sítě v případě dodávky do distribuční soustavy výrazně klesl a tím i vyvolané přepětí v domácnosti.

V případě, že spotřebič je zapnut, odebírá proud  $I_Z = 8,7$  A. polovina potřebného proudu je mu dodávána z FVE, ale zbývající polovina proudu musí být dodaná z elektrárny přes přírodní vedení. Z toho plyne, že  $I_V = 4,35$  A. Tento proud opět způsobuje vznik úbytku napětí.

$$U_V = I_V \cdot R_V = 4,35 \cdot 0,2 = 0,87 \text{ V} \quad (12)$$

Na svorkách zásuvek v domácnosti je  $U_E$  zmenšené o úbytek na přírodním vedení.

$$U_D = U_E - U_V = 230 - 0,87 = 229,13 \text{ V} \quad (13)$$

Opět tedy dochází ke změně velikosti napětí v domácnosti a tím i k flikru.

Čím větší bude velikost zkratové impedance  $Z_K$  a čím větší zátěže  $R_Z$  bude WR spínat, tím větší bude kolísání napětí v domácí síti a tím i flikr.

### 3. Přehled provedených testů a jejich cílů

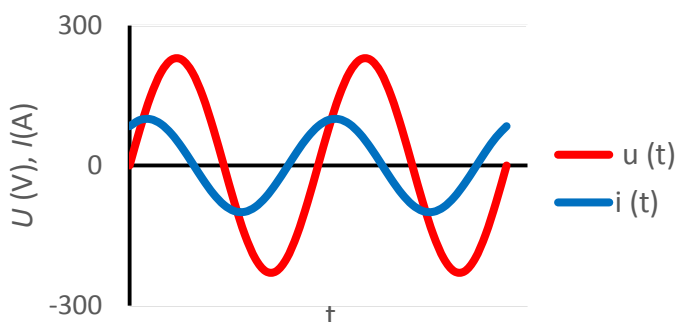
Tato kapitola obsahuje základní přehled všech testů, které byly provedeny v rámci této diplomové práce, a stanovuje, co bylo jejich cílem. Samotnou realizací, provedením a výsledky těchto testů se podrobně zabývají kapitoly 6. a 7.

#### 3.1 Stavy signálů, které mohou negativně ovlivnit měření elektroměru

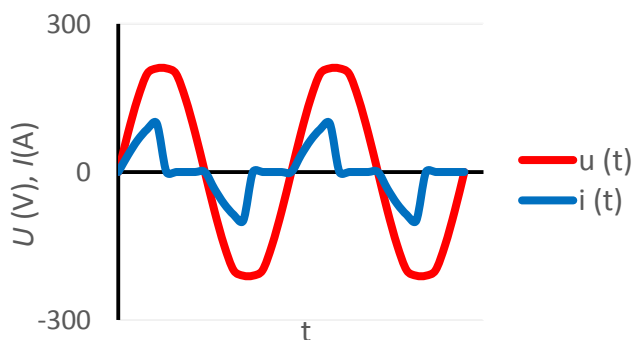
V dnešní době jsou statické elektroměry, měřící spotřebu elektrické energie, v praxi vystaveny nepříznivým podmínkám z hlediska parametrů měřených signálů. Protože jsou dnešní elektroměry vystaveny náročným podmínkám s pohledu měřeného signálu, byly navrženy testy, které mají ověřit dopad těchto podmínek, na měřený údaj elektroměru. Tyto testy nejsou součástí dnešních postupů ověřování elektroměrů metrologických středisek v ČR [10] [11].

##### 3.1.1 Harmonické složky

S nástupem polovodičových spínacích prvků v elektronice došlo také k velkému zvýšení harmonického zkreslení časového průběhu proudu. Některé polovodičové prvky použité pro regulaci výkonu například umožňují vést proud po určitou dobu periody napájecího napětí. To má za následek vznik vysokého obsahu harmonických složek proudu. Protože žádná distribuční soustava není ideální, ale obsahuje impedance jednotlivých komponent, jako jsou transformátory, kabely, vzdušné vedení, projevuje se harmonické zkreslení také na průběhu napětí. V praxi se tak setkáváme se stavy, že napětí je téměř sinusové a průběh proudu je značně zkreslen velkým obsahem harmonických složek, viz obr. 6.



Obr. 5 Ideální sinusový průběh proudu a napětí



Obr. 6 Průběh proudu a napětí běžný v praxi



Metrologický předpis [10] pro testování elektroměrů na území ČR, závazný pro pracovníky autorizovaných metrologických středisek velkých distribučních společností ČEZ, E.ON, PRE stanovuje postup pro ověřování správnosti měření elektroměrů. Obsahuje sadu ověření a testů, které musí autorizované metrologické středisko provést. Tento dokument však neobsahuje žádný test ověřující vliv harmonických složek obsažených v průběhu napětí a proudu. Norma ČSN EN 62053-22 [11] obsahuje pouze test s pátou harmonickou proudovou a napěťovou a test dopadu subharmonických složek na přesnost měření.

Cílem testů z této oblasti bylo ověření správnosti měření statických elektroměrů za přítomnosti širokého spektra harmonických složek v průběhu proudu a napětí. Záznamy z testů jsou v kap. 6.1.

### **3.1.2 Rychlé změny mezi režimem dodávky a odběru energie**

V kap. 2 byly popsány důvody nasazení WR a jeho princip regulace. Při procesu, který byl nazván rychlá regulace, dochází k časté změně mezi odběrem a dodávkou energie do distribuční sítě. Při tom se využívá nedokonalosti statického elektroměru v podobě časového okna  $T_w$  (bylo popsáno v kap. 1.1).

Pro přesnější pochopení děje, který probíhá ve statickém elektroměru při rychlém střídání mezi odběrem o dodávkou energie do distribuční soustavy, byla vedoucím diplomové práce vytvořena aplikace, která tento proces simuluje. Aplikace se nachází na DVD s diplomovou prací. Zjištěným poznatkům z této aplikace se podrobně věnuje kap. 6.2.

Velikost  $T_w$  statického elektroměru není v normách stanovena. Každý typ statického elektroměru může mít jiné  $T_w$ . Cílem testů z této oblasti bylo zjistit velikost  $T_w$  konkrétního statického elektroměru a vliv rychlého střídání dodávky a odběru energie z distribuční soustavy na měřený údaj elektroměru. Viz kap. 6.3.

## **3.2 Testy wattrouteru**

Tato kapitola se zabývá popisem testů, které ověřovaly způsob regulace konkrétního WR Greenbono a jeho dopad na distribuční soustavu z hlediska flikru, který vzniká jeho činností.

### **3.2.1 Ověření způsobu regulace wattrouteru**

Cílem testu bylo zjistit a podrobně popsat způsob regulace WR Greenbono. Zjišťovalo se jakým způsobem, v jakém pořadí a s jakou prioritou Greenbono spíná jednotlivé zátěže a jak lze ovlivnit proces regulace pomocí dodávaného softwaru od výrobce. Viz kap. 7.1.

### **3.2.2 Měření flikru při regulaci wattrouteru**

Časté zapínání a vypínání zátěže, které je prováděno WR v rámci regulace přebytků elektrické energie, má za následek vznik flikru v distribuční soustavě. Cílem testu bylo změřit konkrétní hodnoty flikru při simulovaných podmínkách domácí sítě s vlastní FVE. Viz kap. 7.2.2.

### **3.2.3 Simulovaný test flikru způsobeného wattrouterem**

Na základě poznatků z testů v předchozích dvou kapitolách byl vytvořen program, který simuloval kolísání napětí vlivem regulace WR. Cílem testu bylo naměřit charakteristiku zachycující průběh velikosti flikru na sřídě spínání spotřebiče řízeného přes WR při zadaných podmínkách. Viz kap. 7.3.

## 4. Kalibrátor CMC 256plus

Tato kapitola se zabývá popisem kalibrátoru **CMC 256plus** od firmy Omicron, který byl použit pro generování průběhů proudu a napětí při testování elektroměrů a WR. Zabývá se popisem jeho periférií a možností ovládání přes softwarový balíček Test Universe.



Obr. 7 Kalibrátor CMC 256plus

### 4.1 Periférie a jejich vlastnosti

CMC 256plus je vysoce přesné testovací zařízení a kalibrátor [12]. Je vybaven těmito perifériemi:

- jedním čtyřfázovým napěťovým výstupem s rozsahem fázových napětí do 300 V, který je možné překonfigurovat na jednofázový napěťový výstup s rozsahem napětí do 600 V. Chyba výstupu je menší než 0,015 % rd. + 0,005 % rg.
- dvěma třífázovými proudovými výstupy s rozsahem fázových proudů do 12,5 A. Ty je možné rovněž překonfigurovat pro dosažení vyšších proudů (3f x 25A, 1f x 75 A). Chyba výstupu je menší než 0,015 % rd. + 0,005 % rg.
- Stejnoseměrným napěťovým zdrojem s rozsahem 0 V až 264 V
- Čtyřmi binárními výstupy
- Analogovými vstupy  $\pm 10$  V a  $\pm 20$  mA
- Deseti multifunkčními vstupy, které mohou fungovat binárně nebo analogově

Poznámka: Zkratka „rd“ (z anglického reading) znamená čtená měřená hodnota. Zkratka „rg“ (z anglického range) znamená hodnota rozsahu.

### 4.2 Možnosti ovládání přes Test Universe

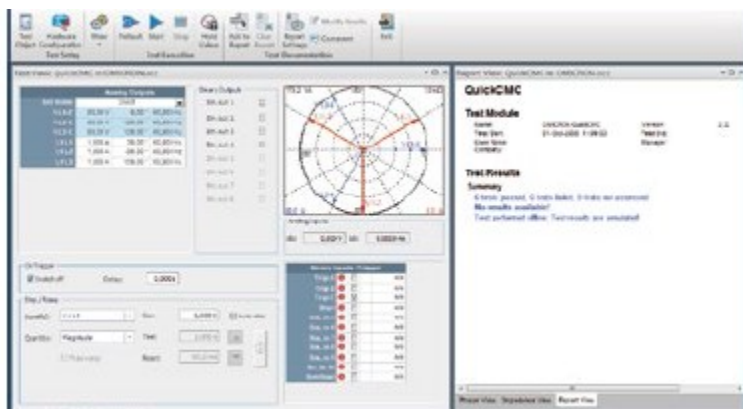
Kalibrátor CMC 256plus nemá vlastní ovládací interface, proto je potřeba ovládat ho z počítače přes rozhraní Ethernet. K jeho ovládání je možné využít programového balíčku Test Universe [13], který obsahuje řadu programových modulů pro specifické úlohy testování. Rovněž je možné využít volně stažitelných ovladačů pro naprogramování vlastní specifické testovací úlohy např. v LabVIEW, viz kap. 5.4.

Z množství softwarových nástrojů z prostředí Test Universe uvádím ty, které souvisí s touto diplomovou prací.

#### 4.2.1 Modul „QuickCMC“

Jedná se o rychlý nástroj vyvinutý pro jednoduché testovací aplikace. Umožňuje manuálně řídit amplitudu, frekvenci a fázi napětí a proudu ve všech fázích. Generované napětí a proud zobrazuje ve vektorovém diagramu. Ovládání tohoto prostředí je velmi intuitivní a je tedy vhodné pro rychlé nasazení. Parametry generovaného proudu a napětí je možné nastavit před generováním a pak spustit

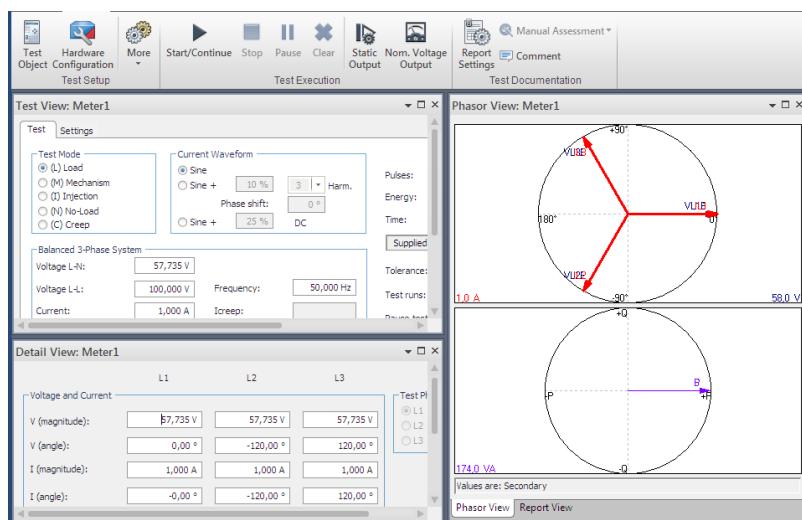
samotné generování nebo je možné měnit parametry postupně přímo za běhu. Třetí možností je použít funkce **hold value**, která umožňuje uzamknutí parametrů generovaných signálů. To znamená, že uživatel může měnit parametry signálů v programu, ale na generovaných průbězích se tyto změny neprojeví, dokud uživatel nedeaktivuje funkci hold value. Tato funkce je výhodná v případě, že je požadováno, aby se více parametrů změnilo skokově najednou a ne postupně.



Obr. 8 Uživatelské rozhraní modulu QuickCMC

#### 4.2.2 Modul „Meter“

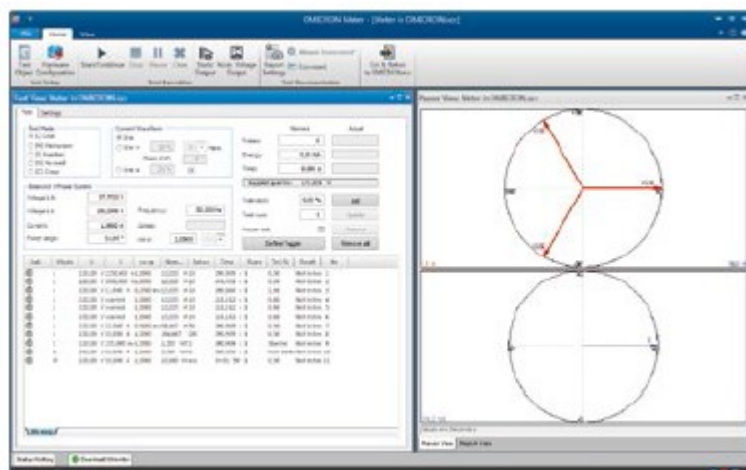
Tento modul je speciálně určen pro testování domácích elektroměrů. Nabízí různé režimy testování. Umožňuje nastavit různé napětí a proud na jednotlivých fázích a také různé fázové posuny mezi napětím a proudem.



Obr. 9 Uživatelské rozhraní modulu Meter

### 4.2.3 Modul „Harmonics“

Jedná se o modul určený ke generování průběhů napětí a proudu s definovaným množstvím harmonických složek. Kalibrátor umožňuje nastavit frekvenci výstupního signálu maximálně do 3 kHz. To znamená, že v případě testů se síťovým napětím s frekvencí 50 Hz je možné generovat nanejvýš harmonickou šedesátého řádu.



Obr. 10 Uživatelské rozhraní modulu Harmonics

## 5. Virtuální instrumentace a dálkové ovládání přístrojů

Tato kapitola se zabývá stručným popisem pojmu virtuální instrumentace. Dále se zabývá popisem programového prostředí LabVIEW vhodným pro vývoj měřicích aplikací. Informace byly čerpány ze zdroje [14] a [15].

### 5.1 Úvod do virtuální instrumentace

V dnešní době se s pojmem „virtuální“ setkáváme na každém kroku, ať už se jedná o řídicí aplikace nebo o simulátory fyzikálních úloh. Tento nový trend zavádění virtuálního prostředí do reálného světa se rovněž značně projevuje i v oblasti měřicí techniky. Funkčnost starších měřicích přístrojů byla striktně dána jejich výrobcem. Tyto přístroje obsahovaly pevný počet měřicích kanálů, mechanické prvky (tlačítka, přepínače, potenciometry) a indikační prvky (LED diody, indikátory) jejichž funkčnost byla dána HW zapojením.

V pozdější době se začaly objevovat měřicí přístroje, které umožňovaly propojení s PC a vzájemnou komunikaci mezi nimi. Díky tomuto způsobu předávání dat byl významně snížen lidský chybový faktor (např. chyba obsluhy při opisování údajů z přístrojů a následný jejich přepis do PC).

Další výhodou propojení měřicího přístroje s PC byla možnost ovládat některé funkce měřicího přístroje z PC a programově tak částečně měnit jeho funkci. Stále však byla hlavní část funkčnosti měřicího zařízení daná výrobcem a uživatel mohl dělat jen parametrizaci předem daných funkcí přístroje. Nicméně tyto přístroje již umožňovaly větší spektrum jejich nasazení a tím svému uživateli zajišťovali větší flexibilitu.

S rostoucími nároky na flexibilitu měřicích přístrojů a rozvojem výpočetní techniky došlo k vytvoření nového trendu virtuální instrumentace. Princip virtuální instrumentace je založen na tom, že si uživatel dle potřeby pořídí měřicí kartu s libovolným počtem vstupů a výstupů (digitální i analogové). Měřicí karta bývá často nazývána jako DAQ – Data Acquisition neboli zařízení pro sběr dat. Tato měřicí karta se pomocí vhodného rozhraní (např. USB) propojí s PC. Měřicí karta následně převádí měřené signály na digitální hodnoty a posílá je pomocí rozhraní do PC. Měřicí karta tedy umožňuje styk PC s reálným světem. Na PC dále běží program, který naměřená data zpracovává přesně podle naprogramovaných algoritmů (zapisuje data do tabulek, ukládá je do souboru, vykresluje grafy, počítá průměry a podobně). Výhodou virtuální instrumentace je velká flexibilita, možnost vytvoření měřicí aplikace přesně na míru a provádění změn algoritmu. Nevýhodou je vývoj měřicího softwaru, který zabere určitou dobu. Software se dá vytvářet jak v textových jazycích (např. C), tak v grafických jazycích (např. LabVIEW).

Virtuální měřicí přístroj má tři základní fáze. První fází je sběr dat, který probíhá prostřednictvím měřicí karty. Druhou částí je analýza dat a výpočty které provádí PC. Třetí částí je prezentace dat, kdy jsou vyhodnocená data zobrazena požadovaným způsobem (tabulky, grafy).



Obr. 11 Komponenty virtuálního měřicího přístroje, přejato ze [14]

## 5.2 Vývojové prostředí LabVIEW

LabVIEW je jedním z prostředků, pomocí kterého lze vytvořit software, který bude ovládat virtuální měřicí přístroj. LabVIEW je komerčním produktem firmy National Instruments (NI).

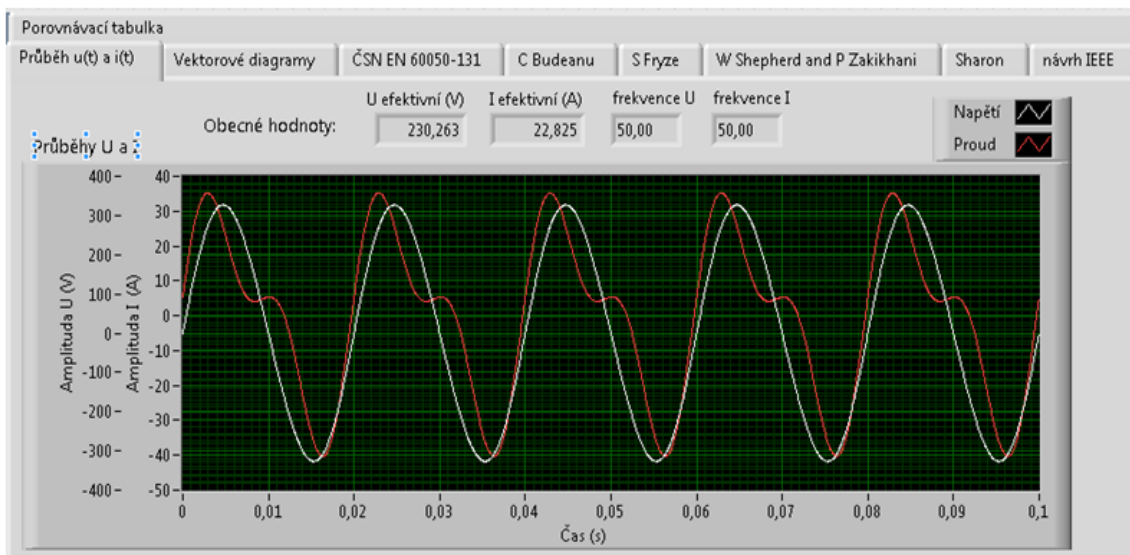
Důvodem proč toto programové prostředí vzniklo, bylo to, že osobou která ví co měřit, jak to analyzovat a jak prezentovat výsledky, je technik. Tento technik ale obvykle nemusí být profesionálním programátorem. Svůj návrh tedy musel předat programátorovi obvykle ve formě blokového schématu a vývojového diagramu. Prací programátora bylo převést funkční schéma do zvoleného programovacího jazyka (v textové podobě), což byla zdlouhavá práce navíc, která do procesu měření nepřinášela žádné inovace.

Cílem vývojářů LabVIEW tedy bylo to, aby blokové schéma bylo koncovým tvarem aplikace a nebylo ho třeba převádět do textové podoby. LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) je tedy grafické vývojové prostředí, které využívá ikon pro tvorbu programu namísto textu. Tyto ikony se spojují linkami pro předávání dat. LabVIEW je obecným vývojovým prostředím s širokým spektrem knihoven pro vytváření aplikací z oblasti měření. Jedná se o plnohodnotný programovací jazyk se všemi odpovídajícími datovými a programovými strukturami v grafické podobě.

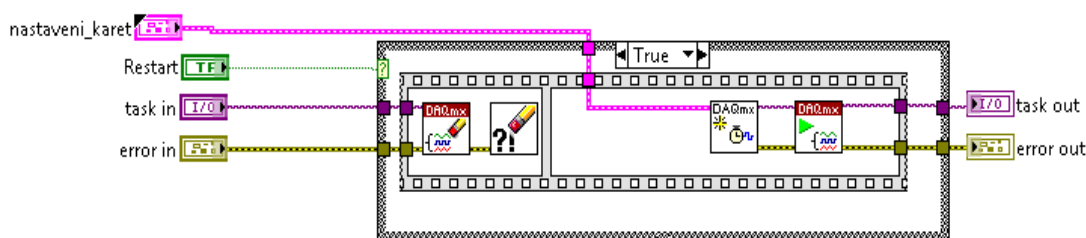
Výsledný produkt tohoto vývojového prostředí se nazývá virtuální instrument (zkráceně VI), protože svým charakterem a činností připomíná skutečný přístroj ve fyzické podobě. Každé VI je tvořeno níže uvedenými částmi:

- 1) **Čelním panelem**, který simuluje čelní panel fyzického přístroje. Obsahuje prvky pro zadávání dat a čtení (spínače, otočné knoflíky, indikátory grafy atd.), viz obr. 5.2a.
- 2) **Blokovým diagramem**, ve kterém se vytváří funkční část VI. Vytváří se pomocí ikon, které reprezentují jednotlivé funkce. Tyto ikony se spojují pomocí linek do blokového schématu, které slouží zároveň jako kód aplikace. Kromě ikon obsahuje blokový diagram dále terminály, které zde reprezentují prvky čelního panelu a slouží pro komunikaci s nimi. Viz obr. 5.2b.
- 3) **Ikonou s konektorovým polem**. LabVIEW umožňuje vytvářet modulární hierarchickou strukturu. Základním kamenem tohoto jazyka jsou ikony, což jsou jednotlivé VI. VI fungují v LabVIEW obdobně jako funkce v jazyce C. Každé vytvořené VI může běžet samostatně nebo být implementováno v kódu jiného VI (pak se jedná o tzv. subVI). Pro to aby šlo použít VI jako subVI v jiném kódu slouží ikona z konektorovým polem, které reprezentují toto subVI v blokovém diagramu jiného VI. Viz obr. 5.2c.

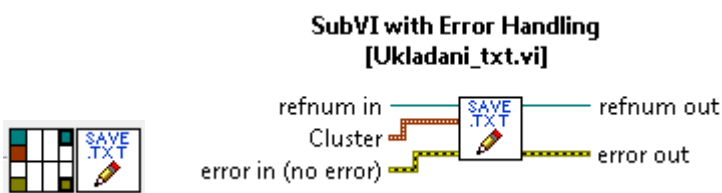
Těmito charakteristickými rysy naplňuje vývojové prostředí LabVIEW podmínky modulárního programování. Svou aplikaci dělí uživatel na jednotlivé úlohy, pro které vytváří dílčí virtuální přístroje (subVI). Z nich následně buduje celou aplikaci jejich spojováním do výsledného virtuálního přístroje.



Obr. 12 Příkladu čelního panelu v LabVIEW, přejato z [15]



Obr. 13 Příkladu blokového diagramu v LabVIEW, přejato z [15]



Obr. 14 Ikona a konektor pro použití VI jako subVI v jiném kódu v LabVIEW, přejato z [15]

### 5.3 Dálkové ovládání přístrojů z LabVIEW, instrument drivers

Nástup digitální měřicí techniky na místo analogové umožnil implementovat do měřicích přístrojů velkou škálu dodatečných funkcí pro zpracování měřených dat [16]. Rovněž umožnil měřicím přístrojům komunikovat s dalšími zařízeními prostřednictvím různých rozhraní, např. Ethernet, GPIB, USB.

Poskytnout data ven ze samotného přístroje se ukázalo jako velice užitečné. Měřicí přístroj mohl zasílat jak surová naměřená data k další analýze, tak i data již přístrojem zpracovaná. Zpracování dat

mimo samotný přístroj umožnilo odlehčit výpočetní výkon měřicímu přístroji, který prováděl vlastní měření a ostatní práci s analýzou, reprezentací nebo ukládáním dat mohl přenechat jiným systémům. Komunikace s měřicím přístrojem však není pouze směrem ven z měřicího přístroje, ale i naopak. Měřicí přístroj je možné vzdáleně řídit, například nastavovat jeho rozsah, spouštět měření, nechat jej provést s daty určitou analýzu a mnoho dalšího. Funkcí, které měřicí přístroj poskytuje je nepřeberné množství a záleží na výrobci, kolik těchto funkcí do konkrétního přístroje implementuje.

Možnost komunikace s měřicím přístrojem umožnila vznik automatizovaných měřicích systémů/zařízení ATE (z anglického Automated Test Equipment) řízených počítačem. Účelem těchto systémů je provést jeden nebo více testů na konkrétním zařízení nebo produktu. Takto testované zařízení se označuje jako DUT (z anglického Device Under Test). Automatizovaným měřicím systémem může být v nejjednodušším případě pouze počítačem řízený multimetr nebo naopak soubor mnoha komplexních testovacích přístrojů pro automatické ověření a vyhodnocení mnoha různých funkcí a parametrů testovaného zařízení.

K účelu komunikace měřicího přístroje s dalšími zařízeními začali vznikat přístrojové ovladače. Přístrojový ovladač je část softwaru, která se stará o nejnižší úroveň komunikace a kontroly měřicího přístroje.

V roce 1990 bylo ustanoveno konsorcium výrobců přístrojové techniky, kteří společně vydali standard SCPI (standard commands for programmable instruments). SCPI je textově založený (ASCII-based) jazyk pro komunikaci s měřicími přístroji. Cílem SCPI bylo standardizovat sady příkazů pro jednotlivé konkrétní funkce přístrojů, což by umožnilo jejich použití napříč přístroji různých výrobců. SCPI tedy pro funkce jako měření napětí nebo měření frekvence definovalo konkrétní sady příkazů. V dnešní době je SCPI stále využíváno. SCPI příkazy můžeme do zařízení zasílat například po LAN, GPIB, USB nebo RS232. Mnoho moderních přístrojů má i několik takovýchto rozhraní a je tedy jen na uživateli, které pro komunikaci zvolí.

Prostředí LabVIEW umožňuje nejen komunikaci s měřicími kartami, ale i komunikaci s různými měřicími a kamerovými systémy. Na oficiálních webových stránkách společnosti National Instruments je možnost stáhnout přístrojové ovladače k často používaným měřicím přístrojům světových výrobců.

## 5.4 Možnost ovládání kalibrátoru CMC 256plus z LabVIEW

Z oficiálních stránek společnosti National Instruments lze stáhnout i balíček ovladačů pro kalibrátor CMC 256plus [17]. Díky tomu lze s kalibrátorem vytvořit specifické testovací úlohy, na které by nám programové prostředí Test Universe nevystačilo. Přehled všech SW funkcí v rámci tohoto přístrojového ovladače je na obr. 15. pro navázání a ukončení komunikace s kalibrátorem slouží funkce **Initialize** a funkce **Close**. Důležité skupiny funkcí z hlediska této diplomové práce byly následující:

- **Output** – obsahuje funkce potřebné pro nastavení parametrů generovaných signálů kalibrátorem (velikost napětí a proudu, frekvence, fázové posuny)
- **Sequencer** – obsahuje funkce potřebné pro nakonfigurování sekvence
- **Action-Status** – obsahuje funkce potřebné pro spuštění různých událostí (spuštění a zastavení generování výstupních signálů, spuštění a zastavení sekvence)





## 6. Implementace a provedení testů na statických EM

Tato kapitola se zabývá návrhem a prováděním testů na skutečných statických EM. Obsahuje výsledky, které byly testováním zjištěny. Také obsahuje popis aplikace, která simulovala chování skutečného statického elektroměru a některé poznatky, které byly na základě ní učiněny. Pro správné porozumění dalším uvedeným informacím uvádím použitou terminologii:

- $T_O$  doba odběru energie ze sítě
- $T_D$  doba dodávky energie do sítě
- $T_P$  perioda změn mezi dodávkou a odběrem neboli součet  $T_O + T_D$
- $A_P$  celková činná energie
- $A_{P+}$  kladná činná energie, označuje odběr energie z distribuční soustavy
- $A_{P-}$  záporná činná energie, označuje dodávku energie do distribuční soustavy
- $i$  počet naměřených pulzů na elektroměru

Pro testy v rámci diplomové práce byly jejím vedoucím vybrány konkrétní statické EM. Níže následuje jejich popis.

Elektroměry označené v textu jako „EM1“, „EM2“ a „EM3“ jsou shodného typu:

Jednokvadrantní elektroměr od výrobce Itron, typ ACE 3000 (type 100),  $U_n 3 \times 230 \text{ V}/400 \text{ V}$ , LED dioda 500 imp/kWh, impulzní výstup 250 imp/kWh,  $I_n = 5 \text{ A}$ ,  $I_{\max} = 100 \text{ A}$ , třída přesnosti: 2.

Elektroměr označen v textu jako „EM4“ je tento typ:

Čtyřkvadrantní elektroměr od výrobce ACTARIS, typ ACE6000 DC47 1H (TCM221/D6-4352),  $U_n 3 \times 230 \text{ V}/400 \text{ V}$ , LED dioda 500 imp/kWh, třída přesnosti 1.



Obr. 16 EM Itron ACE3000 a ACTARIS ACE6000

### 6.1 Testování vysokého obsahu harmonických na přesnost elektroměrů

Hodnoty harmonických složek napětí a proudu vycházely ze skutečných naměřených hodnot v rámci měření kvality elektrické energie u zákazníka. K testům byly použity následující přístroje:

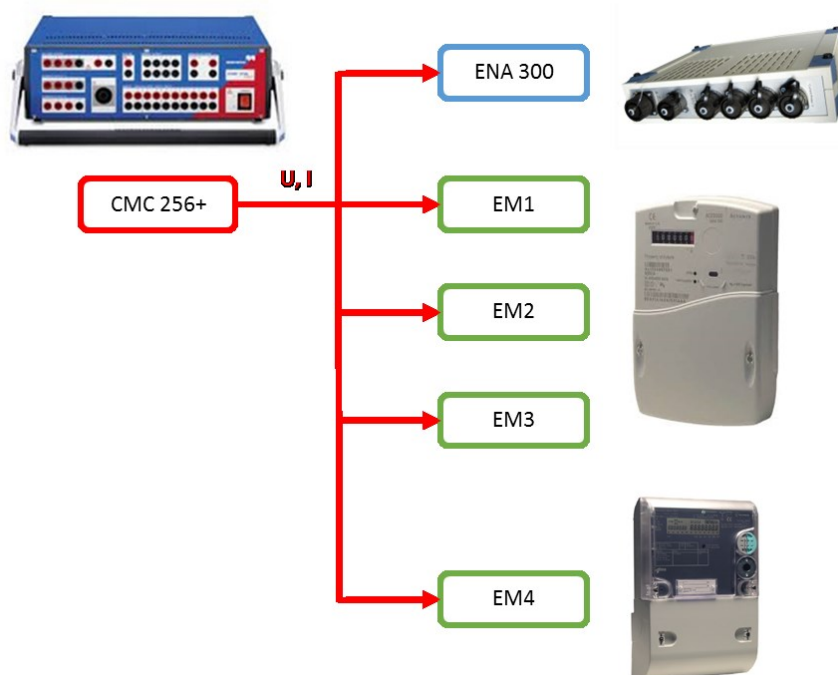
Zdroj napětí a proudu – kalibrátor CMC 256plus

Kontrola správnosti měření – PQA ENA 300

Testované elektroměry – EM1, EM2, EM3, EM4

Přípravek pro snímání metrologických LED elektroměrů postavený na platformě cRIO od NI

Blokové schéma propojení přístrojů:



Obr. 17 Blokové schéma

K ovládání kalibrátoru bylo v tomto případě využito modulu Harmonics ze SW balíčku Test Universe. Pro přesnější zjišťování naměřeného údaje elektroměrem, byly využity metrologické LED. Snímaly se pomocí speciálního přípravku s fototranzistory, který byl připojen k čítači postavenému na modulárním HW cRIO od NI. Tím bylo dosaženo větší přesnosti měření, než v případě pouhého opisování hodnot číselníků a zejména však byl proces měření automatizován. Impulsní konstanta všech čtyř elektroměrů pro LED je 500 impulzů na kWh. Množství naměřené energie se tedy stanoví z naměřeného počtu impulzů.

$$Ap = 2 \cdot i \text{ (Wh)} \quad (14)$$

Níže jsou uvedeny zadání jednotlivých testů a jejich výsledky.

### 6.1.1 Test č. 1 Harmonické složky jen na fázi L1

#### Zadání:

Frekvence stejná pro všechny fáze 50 Hz, fázové posuny mezi  $U$  a  $I$  jsou nulové

Fáze L1:  $U$  podle tab. 6,  $I$  podle tab. 7

Fáze L2 a L3:  $U = 230 \text{ V}$ ,  $I = 0 \text{ A}$

**Doba trvání:** 46 min

**Množství dodávky (podle ENA):** 554 Wh

**Příkon (podle ENA):** 721 W

**Tab. 6 Harmonické složky napětí ve fázi L1,  $U_N = 230$  V (k této hodnotě se vztahují procentuální hodnoty),  $U_{RMS} = 239,91$  V,  $THD_U = 2,33\%$**

Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Amplituda har. (V)	240,488	1,817	1,679	3,841	3,128	0,368	0,483	0,483	0,253
Amplituda har. (%)	104,56	0,79	0,73	1,67	1,36	0,16	0,21	0,21	0,11

**Tab. 7 Harmonické složky proudu ve fázi L1.  $I_{RMS} = 4,463$  A,  $THD_I = 114\%$**

Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Amplituda har. (mA)	2940	1400	2200	1400	1400	600	400	200	200

**Tab. 8 Výsledky testu**

Elektroměr	EM1	EM2	EM3	EM4	ENA
Počet pulzů	279	278	278	277	---
energie (Wh)	558	556	556	554	554
Rozdíl od ENA (Wh)	4	2	2	0	---
relativní chyba (%)	0,72	0,36	0,36	0,00	---

### 6.1.2 Test č. 2 Harmonické složky stejné na všech fázích

#### Zadání:

Všechny hodnoty stejné pro všechny fáze,  $f = 50$  Hz, fázové posuny mezi  $U$  a  $I$  jsou nulové, napětí podle tab. 9, proud podle tab. 10.

**Doba trvání:** 46 min

**Množství dodávky (podle ENA):** 1450 Wh

**Příkon (podle ENA):** 2159 W

**Tab. 9 Harmonické složky napětí ve všech fázích,  $U_n = 230$  V (k této hodnotě se vztahují procentuální hodnoty),  $U_{RMS} = 240,52$  V,  $THD_U = 2,33\%$**

Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Amplituda har. (V)	240,488	1,817	1,679	3,841	3,128	0,368	0,483	0,483	0,253
Amplituda har. (%)	104,56	0,79	0,73	1,67	1,36	0,16	0,21	0,21	0,11

**Tab. 10 Harmonické složky proudu ve všech fázích.  $I_{RMS} = 4,463$  A,  $THD_I = 114\%$**

Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Amplituda har. (mA)	2940	1400	2200	1400	1400	600	400	200	200

**Tab. 11 Výsledky testu**

Elektroměr	EM1	EM2	EM3	EM4	ENA
Počet pulzů	729	728	729	727	---
energie (Wh)	1458	1456	1458	1454	1450
Rozdíl od ENA (Wh)	8	6	8	4	---
relativní chyba (%)	0,55	0,41	0,55	0,28	---

### 6.1.3 Test č. 3 Harmonické složky různé na všech fázích

#### Zadání:

Frekvence stejná pro všechny fáze 50 Hz, fázové posuny mezi  $U$  a  $I$  jsou nulové, napětí v jednotlivých fázích podle tab. 12, proud v jednotlivých fázích podle tab. 13.

**Doba trvání:** 2 h 35 min 17 s

**Množství dodávky (podle ENA):** 600 Wh

**Příkon (podle ENA):** 230 W

Tab. 12 Harmonické složky napětí ve všech fázích,  $U_n = 230$  V (k této hodnotě se vztahují procentuální hodnoty)

Fáze 1, $U_{RMS} = 240,52$ V, $THD_U = 2,31\%$									
Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Amplituda har. (V)	240,488	1,817	1,679	3,841	3,128	0,368	0,483	0,483	0,253
Amplituda har. (%)	104,56	0,79	0,73	1,67	1,36	0,16	0,21	0,21	0,11
Fáze 2, $U_{RMS} = 241,94$ V, $THD_U = 1,84\%$									
Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Amplituda har. (V)	241,914	1,702	1,334	2,668	2,668	0,483	0,253	0,483	0,368
Amplituda har. (%)	105,18	0,74	0,58	1,16	1,16	0,21	0,11	0,21	0,16
Fáze 3, $U_{RMS} = 242,92$ V, $THD_U = 2,01\%$									
Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Amplituda har. (mA)	242,903	2,185	1,219	2,783	2,921	0,483	0,598	0,851	0,253
Amplituda har. (%)	105,61	0,95	0,53	1,21	1,27	0,21	0,26	0,37	0,11

Tab. 13 Harmonické složky proudu v každé fázi jiné

Fáze L1, $I_{RMS} = 222$ mA, $THD_I = 114,44\%$									
Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Amplituda har. (mA)	147	70	110	70	70	30	20	10	10
Fáze L2, $I_{RMS} = 381$ mA, $THD_I = 33,93\%$									
Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Amplituda har. (mA)	361	50	50	80	30	40	10	30	10
Fáze L3, $I_{RMS} = 443$ mA, $THD_I = 8,18\%$									
Řád harmonické	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Amplituda har. (mA)	441	20	30	0	0	0	0	0	0

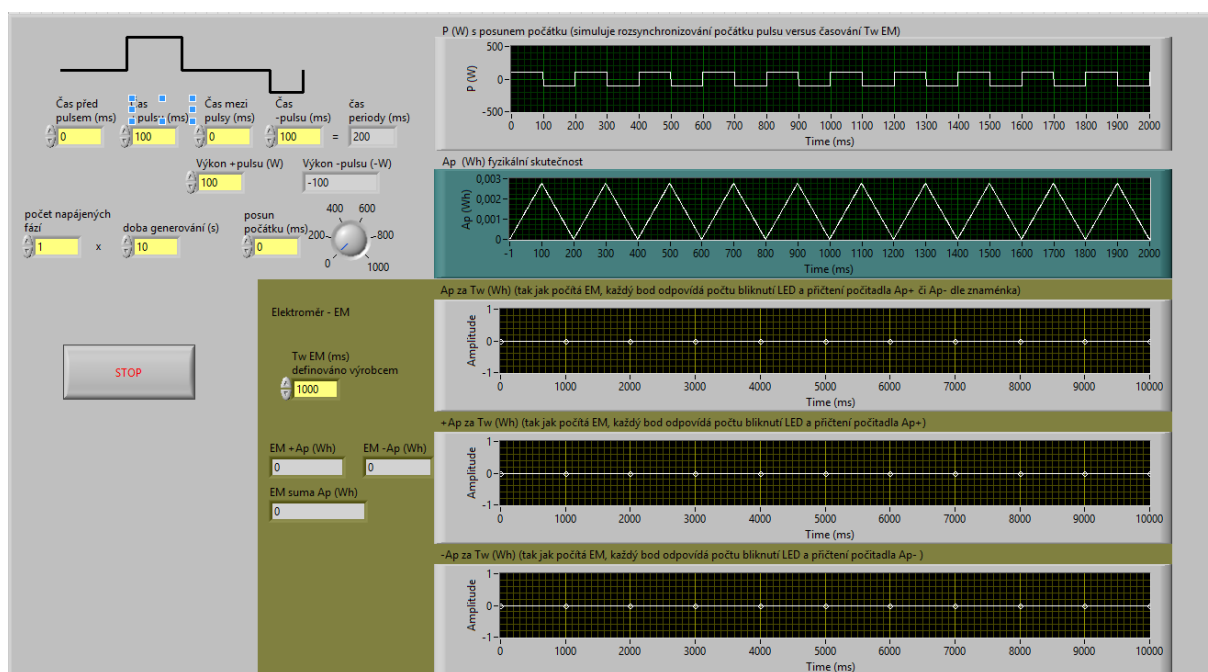
Tab. 14 Výsledky testu

Elektroměr	EM1	EM2	EM3	EM4	ENA
Počet pulzů	292	303	301	301	---
energie (Wh)	584	606	602	602	600
Rozdíl od ENA (Wh)	-16	6	2	2	---
relativní chyba (%)	2,67	1,00	0,33	0,33	---

## 6.2 Simulace chování EM při rychlém střídání dodávky a odběru energie

Pro přesnější pochopení děje, který probíhá ve statickém čtyř-kvadrantním elektroměru při rychlém střídání mezi odběrem energie z distribuční soustavy a dodávkou energie do distribuční soustavy, byla vedoucím diplomové práce vytvořena speciální aplikace v LabVIEW. Tato aplikace simuluje chování měření skutečného elektroměru. Umožňuje nastavit časovou délku a velikost výkonu pulzu pro odběr z distribuční soustavy a časovou délku pulzu pro dodávku do distribuční soustavy. Výkon pulzu pro dodávku je automaticky stanoven tak, aby energie tohoto pulzu byla stejná jako energie pulzu odběru. Tím je zajištěno, že **střední hodnota energie po dobu periody je vždycky nulová**. Mezi pulzem odběru a dodávky lze ještě případně nastavit čas doby mezi těmito pulzy, kdy je výkon nulový.

Další tři parametry, které lze nastavit, je počet napájených fází, doba generování výkonových pulzů a posun počátku výkonového signálu v čase. Počet napájených fází a doba generování výkonových pulzů ovlivňují celkové množství dodaného a odebraného výkonu. Třetí parametr, posun v počátku, je důležitý pro možnost simulace časového posunu mezi začátkem generování výkonového signálu a začátkem měření elektroměrem. Tento rozdíl totiž může za jistých okolností významně ovlivnit výsledné údaje naměřené elektroměrem. Poslední parametr, který lze nastavit je délka časového okna  $T_w$  simulovaného elektroměru.



Obr. 18 Čelní panel aplikace simulující chování statického EM při rychlých změnách toku výkonů

Aplikace zobrazuje, jak vypadá skutečný průběh energie v čase a kolik energie bylo skutečně dodáno a odebráno z distribuční soustavy. Dále zobrazuje, jaký průběh naměří elektroměr za daných podmínek a jaký bude jeho konečný stav paměťových registrů pro dodávku a odběr energie. Jednotlivé parametry simulace lze měnit za chodu a tak lze snadno sledovat, jak změna jednotlivých parametrů ovlivňuje měření elektroměru.

### Zjištěné poznatky

Zjištěné poznatky platí v případě, že pulz dodávky má stejnou energii jako pulz odběru

- Pokud je délka  $T_w$  rovna periodě střídání dodávky a odběru  $T_p$  nebo je jejím celočíselným násobkem, nenaměří elektroměr žádnou dodávku ani odběr bez ohledu na parametr posun v počátku.
- Pokud je délka  $T_w$  přesně dvakrát větší než perioda střídání dodávky a odběru  $T_p$  může elektroměr naměřit hodnoty v rozsahu od nuly po skutečné hodnoty. Výsledek závisí jen na parametru posun v počátku.
- Čím více jsou  $T_w$  a  $T_p$  od sebe rozdílné z hlediska nejmenšího společného násobků (např.  $T_w = 1257$  ms a  $T_p = 543$  ms), tím menší vliv má parametr posun v počátku na naměřený údaj elektroměru

## 6.3 Automatizované ověření délky $T_w$ elektroměru za pomoci odečtu registrů přes IR hlavu

K testům byly použity následující přístroje:

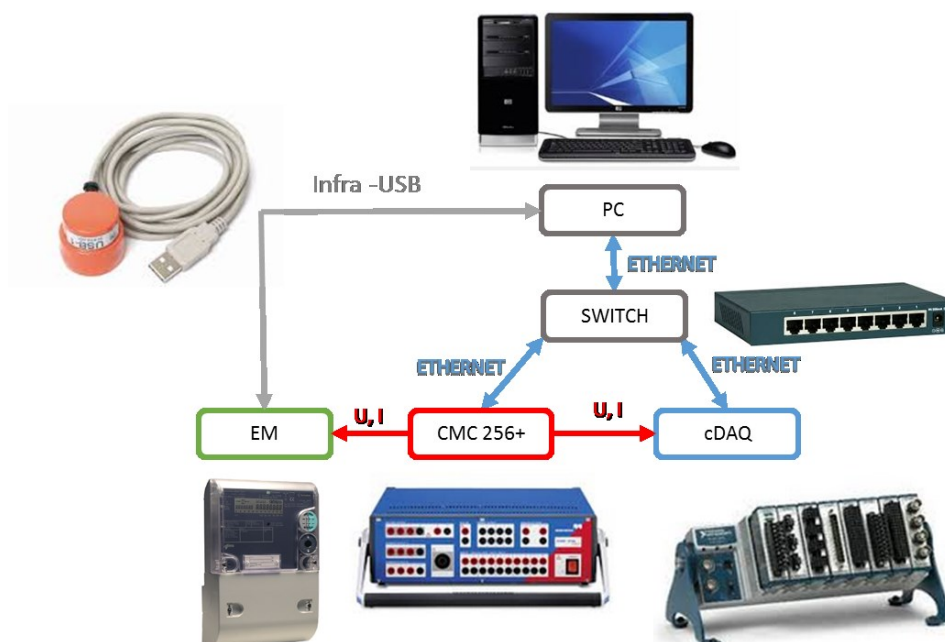
Zdroj napětí a proudu – kalibrátor CMC 256plus

Testovaný elektroměr – EM4

Kontrola správnosti měření – cDAQ 9188

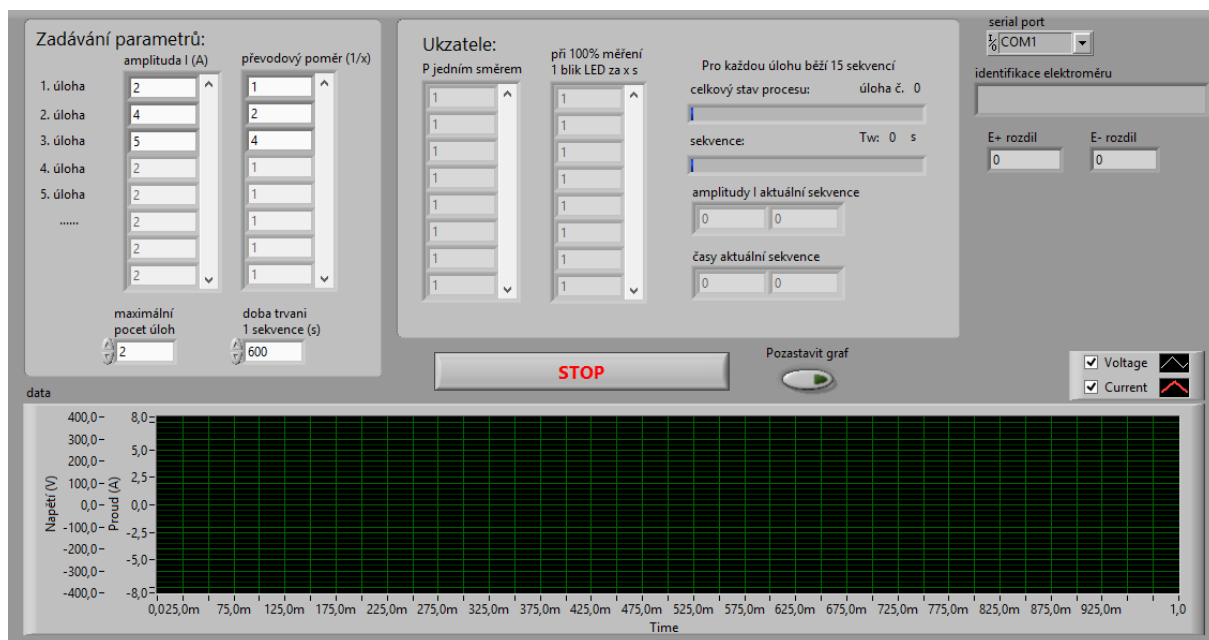
Moduly v zařízení cDAQ - NI 9227 (5 A rms), NI 9225 (230 V rms)

Propojení jednotlivých komponent v tomto testu je na následujícím obrázku



Obr. 19 Blokové schéma

## Čelní panel testovací aplikace



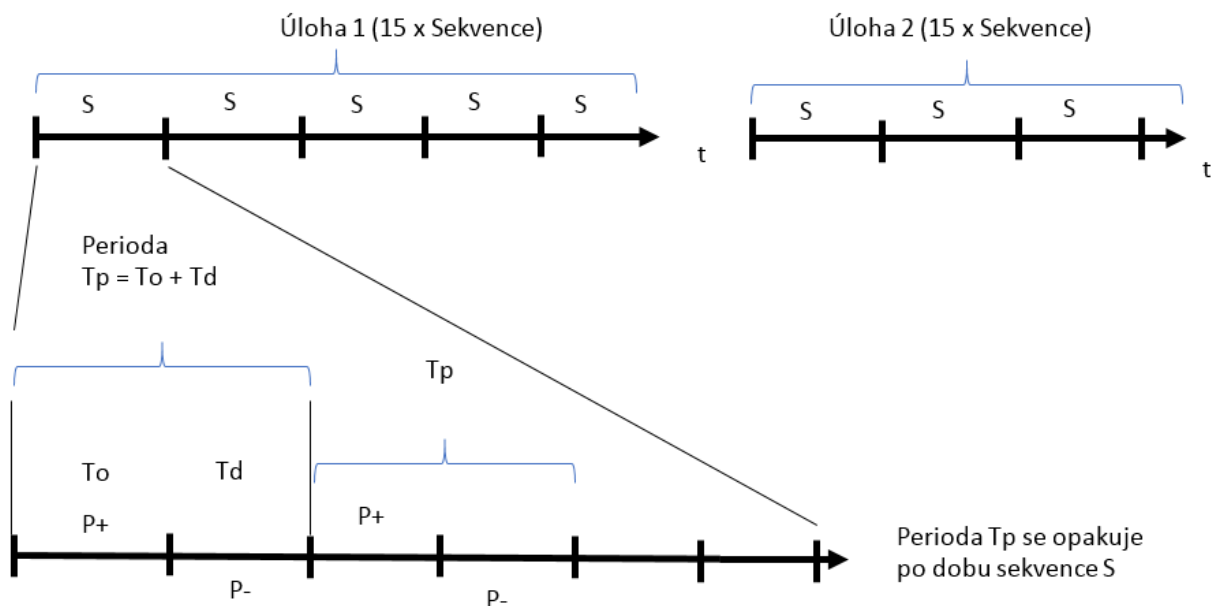
Obr. 20 Čelní panel aplikace pro testování časové délky  $T_w$  EM4

Níže jsou vysvětlené některé pojmy vztahující se k popisu tohoto testu:

- **Úlohou** rozumíme základní jednotku testovacího programu. Je určena proudem pro odběr a poměrem výkonů. V rámci každé úlohy je spuštěno patnáct po sobě jdoucích sekvencí, kdy každá sekvence trvá dobu  $T_s$ . Patnáct sekvencí je proto, že se testuje 15 různých  $T_p$  (0,6 – 2 s).
- **Sekvence** je podmnožinou úlohy. Po dobu jejího trvání  $T_s$  se neustále opakuje perioda  $T_p$ .
- **Perioda** je sled dvou stavů, které se v čase neustále opakují na základě stanovených podmínek.  $T_p = T_O + T_D$
- **Stav** je podmnožinou periody, obsahuje velikost a směr proudu a dobu trvání toku proudu.
  - $T_O$  doba odběru energie (Stav 1)  $P$  je kladné ( $P+$ )
  - $T_D$  doba dodávky energie (Stav 2)  $P$  je záporné ( $P-$ )
- **Poměr PT** je poměr mezi kladnou částí výkonu a zápornou částí výkonu ( $P+/P-$ ), tak aby energie za  $T_p$  byla rovna nule. Poměr PT samozřejmě ovlivňuje i poměr časů  $T_O/ T_D$ .

Význam těchto pojmů znázorňuje následující obrázek





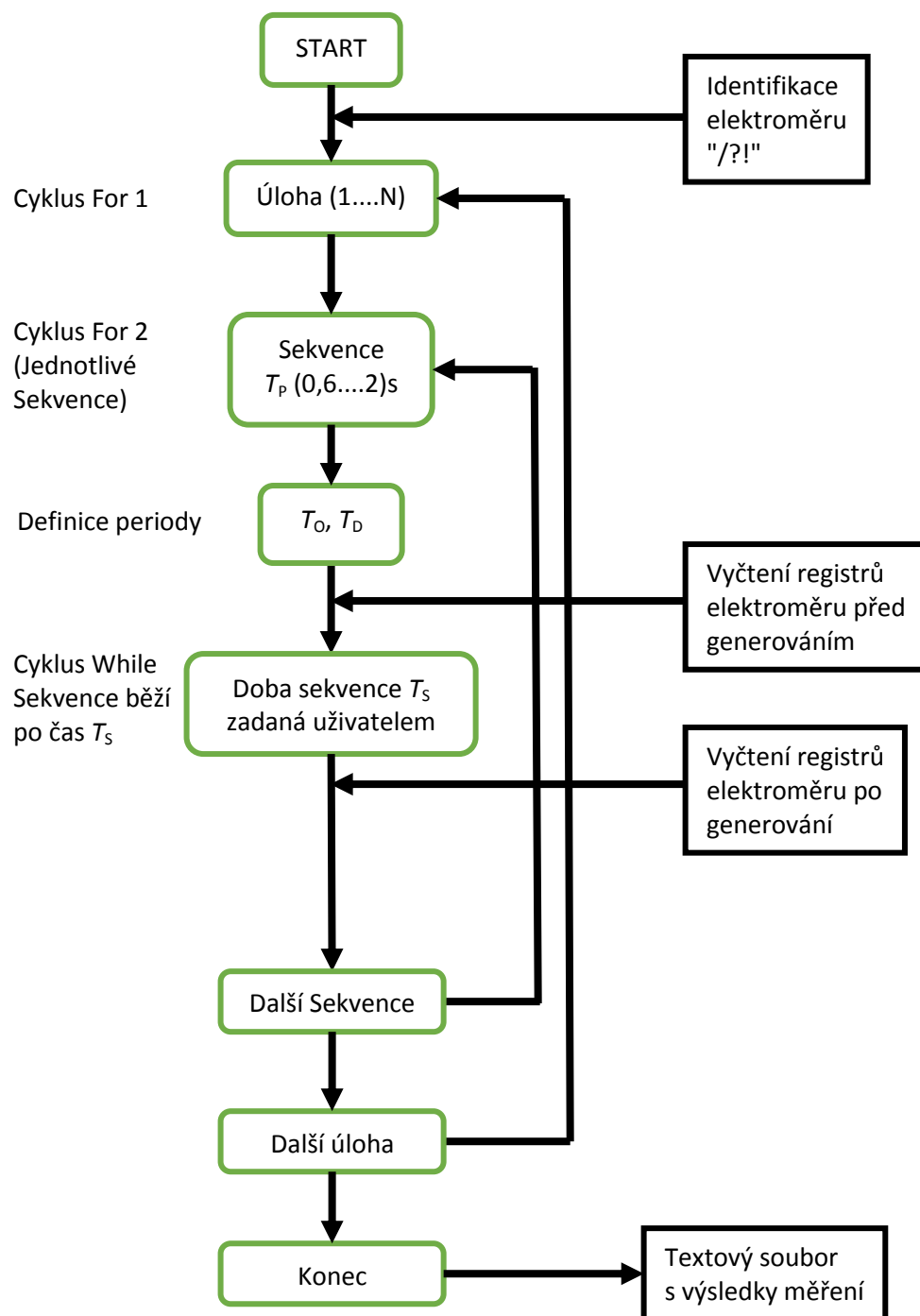
Obr. 21 Znáznornění vztahů mezi pojmy stav, perioda a úloha

Automatizovaný test byl spuštěn v prostředí LabVIEW. Program ovládá kalibrátor CMC 256plus podle zadané testovací sekvence. Do řídicího programu se zadala hodnota generovaného proudu pro odběr a poměr PT proudu i času. Podle těchto údajů vygeneruje program zadání pro 15 různých sekvencí (15 různých testovaných  $T_p$  v rozsahu od 0,6 s po 2 s, krok 0,1 s). Dále se zadá čas  $T_s$  jednotný pro všechny sekvence.

#### Příklad:

Pokud je  $I = 4$  A a poměr  $PT = 4$ , znamená to, že se po dobu  $T_o$  bude generovat  $I = 4$  A ve fázi s napětím a po dobu  $T_d$  (4 x delší než  $T_o$ )  $I = 1$  A s opačnou fází oproti napětí. Tak je pro každé  $T_p$  zajištěna vždy střední hodnota  $P = 0$ . Dále při zadání doby sekvence 60 s poběží každá sekvence 60 s (pro jedno testované  $T_p$  jedna sekvence).

Po dokončení všech testovacích úloh se program automaticky ukončí. Během měření se průběžně generuje textový report, který zaznamenává zadání každé úlohy, naměřené hodnoty a nakonec status programu (jestli byl ukončen správně nebo byl přerušen nějakou chybou). Funkci testovacího programu znázorňuje vývojový diagram na obr. 22.



Obr. 22 Vývojový diagram řídicího programu v LabVIEW

### 6.3.1 Protokol komunikace s elektroměrem přes IR port

Z důvodu problému s blikáním impulsní LED a spínacích kontaktů v případě rychlého střídání mezi odběrem a dodávkou, který je popsán v kapitole 6.4, bylo nutné použít jiný způsob pro automatizované měření množství energie naměřené elektroměrem. Ke stanovení množství naměřené energie elektroměrem bylo potřeba použít infračervený komunikační port, který funguje jako sériová linka. S jeho pomocí lze zjistit přesnou hodnotu aktuálního stavu registrů odběru  $A_{p+}$  a dodávky  $A_{p-}$ .

Pro možnost použití IR portu bylo zapotřebí nastudovat informace ohledně daného komunikačního protokolu. Způsob této komunikace popisuje norma ČSN EN 62056-21 [20]. EM4 na kterém byl proveden test délky  $T_w$  komunikuje v režimu protokolu C.

Komunikační režim C zajišťuje obousměrnou výměnu dat s přepínáním přenosové rychlosti. Tento režim umožňuje odečet dat, programování se zvýšeným zabezpečením a přepnutí do režimů stanovených výrobcem. Odečet dat probíhá tím způsobem, že řídicí systém pošle rámec s požadavkem na elektroměr. Elektroměr poté přenáší rámec s identifikací. Po přenesení rámce s identifikací čeká elektroměr na „rámec s volbou potvrzení/možnosti“ od řídicího systému. Tou může být požadavek na odečet dat, přepnutí do programovacího režimu nebo přepnutí do režimu stanoveného výrobcem.

Typ použitého přenosu je sériový asynchronní, poloduplexní [21]. Výchozí přenosová rychlost je 300 baudů. Další normalizované rychlosti jsou 600, 1200, 2400, 4800, 9600 a 19200 baudů. Zařízení mohou podporovat i jiné přenosové rychlosti.

### 6.3.2 Výsledky testů z oblasti délky $T_w$

Obsah textového souboru s výsledky, který byl automaticky vygenerován po dokončení testování:

Datum: 2. 7. 2014, čas: 11:33

Identifikace elektroměru: /ACE5\2\@DC471HMPCWQZ

Doba trvání každé sekvence: 600 s

Úloha č. 1;

$U_1 = U_2 = U_3 = 230 \text{ V}$

$I_1 = I_2 = I_3 = 5,00 \text{ A}$

$P_1 = P_2 = P_3 = 1150 \text{ W}$  (kladný i záporný impuls výkonu)

poměr  $P_T = 1/1$  ( $P_+/P_-$ )

$T_w$ : 0,6 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,039 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,039 kWh

$T_w$ : 0,7 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,050 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,050 kWh

$T_w$ : 0,8 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,041 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,041 kWh

$T_w$ : 0,9 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,026 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,025 kWh

$T_w$ : 1,0 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,001 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,000 kWh

$T_w$ : 1,1 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,026 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,027 kWh

$T_w$ : 1,2 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,043 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,043 kWh

$T_w$ : 1,3 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,068 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,066 kWh

$T_w$ : 1,4 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,082 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,084 kWh

$T_w$ : 1,5 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,096 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,096 kWh

$T_w$ : 1,6 s; naměřený odběr  $E_+$ : 0,106 kWh; naměřená dodávka  $E_-$ : 0,104 kWh

Tw: 1,7 s; naměřený odběr E+: 0,119 kWh; naměřená dodávka E-: 0,119 kWh  
 Tw: 1,8 s; naměřený odběr E+: 0,128 kWh; naměřená dodávka E-: 0,128 kWh  
 Tw: 1,9 s; naměřený odběr E+: 0,137 kWh; naměřená dodávka E-: 0,137 kWh  
 Tw: 2,0 s; naměřený odběr E+: 0,043 kWh; naměřená dodávka E-: 0,042 kWh

Úloha č. 2;

$I = 5,00 \text{ A}$  (pro P+),  $I = 2,5 \text{ A}$  (pro P-)

poměr  $PT = 1/2 (P+/P-)$

Tw: 0,6 s; naměřený odběr E+: 0,019 kWh; naměřená dodávka E-: 0,020 kWh  
 Tw: 0,7 s; naměřený odběr E+: 0,032 kWh; naměřená dodávka E-: 0,033 kWh  
 Tw: 0,8 s; naměřený odběr E+: 0,029 kWh; naměřená dodávka E-: 0,028 kWh  
 Tw: 0,9 s; naměřený odběr E+: 0,018 kWh; naměřená dodávka E-: 0,018 kWh  
Tw: 1,0 s; naměřený odběr E+: 0,001 kWh; naměřená dodávka E-: 0,000 kWh  
 Tw: 1,1 s; naměřený odběr E+: 0,019 kWh; naměřená dodávka E-: 0,017 kWh  
 Tw: 1,2 s; naměřený odběr E+: 0,030 kWh; naměřená dodávka E-: 0,031 kWh  
 Tw: 1,3 s; naměřený odběr E+: 0,044 kWh; naměřená dodávka E-: 0,045 kWh  
 Tw: 1,4 s; naměřený odběr E+: 0,054 kWh; naměřená dodávka E-: 0,054 kWh  
 Tw: 1,5 s; naměřený odběr E+: 0,048 kWh; naměřená dodávka E-: 0,048 kWh  
 Tw: 1,6 s; naměřený odběr E+: 0,073 kWh; naměřená dodávka E-: 0,072 kWh  
 Tw: 1,7 s; naměřený odběr E+: 0,079 kWh; naměřená dodávka E-: 0,078 kWh  
 Tw: 1,8 s; naměřený odběr E+: 0,085 kWh; naměřená dodávka E-: 0,084 kWh  
 Tw: 1,9 s; naměřený odběr E+: 0,091 kWh; naměřená dodávka E-: 0,092 kWh  
 Tw: 2,0 s; naměřený odběr E+: 0,117 kWh; naměřená dodávka E-: 0,116 kWh

#### **Závěr z testu:**

Z provedeného testu je jasné vidět, že Tw elektroměru (implementace výrobcem) je 1 s. Při této hodnotě elektroměr v interních registrech nenaměřil téměř žádný odběr ani dodávku, viz potvrzené řádky z reportu. Naopak s rostoucí změnou Tw od 1 s rostlo i množství naměřené energie, což odpovídá teoretickým předpokladům.

### **6.4 Testování chování metrologické LED a impulzních výstupů v případě rychlého přepínání mezi odběrem a dodávkou**

Kapitola se věnuje testům provedeným na EM4 se zaměřením na chování metrologické LED a impulzních výstupů při rychlém střídání mezi odběrem a dodávkou energie do distribuční sítě.

Pokud dochází k rychlým změnám v režimech dodávky a odběru (např. vlivem WR), kdy střední hodnota činného výkonu je  $P = 0 \text{ W}$  pro určité  $T_p$ , metrologická LED neblinká. Přesto však dochází ke kumulaci energie do paměťových registrů v elektroměru. Stejná situace nastává u impulzních výstupů (250 imp/kWh neboli 1 impuls na 4Wh =  $K_{EM}$ ), které jsou k dispozici separátně pro činnou dodávku energie a separátně pro činný odběr energie. Pokud však při změnách odběru a dodávky v rámci  $T_p$  nebyla dodržena střední hodnota  $P = 0$ , blikala LED dioda a také reagoval signál impulsní výstup pro energii, která převažovala.

Konkrétní příklady střídání odběru a dodávky následují. Použitý zdroj napětí a proudu byl kalibrátor CMC 256plus.

### Test 1:

$T_p = 20$  s,  $T_o = 10$  s (odběr),  $T_D = 10$  s (dodávka).

$U = 230$  V,  $I = 5$  A pro všechny 3 fáze

Délka testu: 5 min 4 s = 304 s

Výpočet výkonu a energie generované kalibrátorem:

$$P = U \cdot I \cdot 3 = 230 \cdot 5 \cdot 3 = 3450 \text{ W} \quad (15)$$

$$A_p = P \cdot t = 3450 \cdot \frac{304}{3600} = 291,3 \text{ Wh} \quad (16)$$

Protože polovinu času byla dodávka a polovinu času odběr, pak pro jeden směr toku výkonu (odběr nebo dodávku) platí:

$$A_{p+} = \frac{A_p}{2} = \frac{291,3}{2} = 145,7 \text{ Wh} \quad (17)$$

Očekávaný počet pulsů EM vypočtený na základě energie dodané kalibrátorem (konstanta impulsního výstupu je  $K_{EM} = 4$  Wh):

$$i = \frac{A_{p+}}{K_{EM}} = \frac{145,7}{4} = 36,43 \cong 36 \quad (18)$$

EM naměřil počet impulzů dodávky = 15, počet impulzů odběru = 15

Z toho vyplývá, že více než 50% energie nebylo impulsním výstupem elektroměru registrováno. To ale nutně neznamená, že elektroměr fyzicky naměřil méně než 50% energie do svých vnitřních registrů  $A_p$ . Z testu délky  $T_w$  v předchozí kapitole totiž vyplynulo, že pro EM4  $T_w = 1$  s. A v tomto testu byla perioda změn  $T_p = 20$  s. Z toho vyplývá že EM4 do svých registrů zaznamenal mnohem větší hodnoty energie než kolik odpovídalo impulsním výstupům. Při těchto testech nebyla k dispozici IR čtecí hlava, takže hodnoty registrů nemohly být přesně vyčteny. K zjištění přibližné hodnoty ale lze použít aplikaci simulující chování EM popsanou v kap. 6.2, protože je k dispozici zadání testu a již je také známá časová délka  $T_w$  EM4. Po zadání těchto hodnot do aplikace vyplývá, že přibližná hodnota naměřená EM4 byla  $A_{p+} = A_{p-} = (130 - 145) \text{ Wh}$ . Rozptyl je způsoben závislostí na posunu mezi  $T_w$  elektroměru a generovanou  $T_p$ .

### Test 2:

$T_p = 6$  s,  $T_o = 3$  s (odběr),  $T_D = 3$  s (dodávka).

$U = 230$  V,  $I = 5$  A pro všechny 3 fáze

Množství energie odběru a dodávky bylo v rámci každého  $T_p$  stejné.

### Výsledek:

Během generování docházelo ke kontinuální kumulaci energie do paměťových registrů, což bylo patrné z hodnot na displeji EM. Přestože množství naměřené energie v obou registrech EM ( $A_{p+}$  a  $A_{p-}$ )

po dobu několika  $T_P$  přesáhlo hodnoty potřebné pro odeslání impulsů, žádné impulsy nebyly generovány ani na metrologické LED ani na impulsních výstupech.

### Test 3:

$T_P = 6$  s,  $T_O = 4$  s (odběr),  $T_D = 2$  s (dodávka), střední hodnota  $P$  není rovna 0.

$U = 230$  V,  $I = 5$  A, pro všechny 3 fáze

délka testu: 4 min 12 s = 252 s

$$P = U \cdot I \cdot 3 = 230 \cdot 5 \cdot 3 = 3450 \text{ W} \quad (19)$$

$$A_{P+} = P \cdot t \cdot \frac{T_O}{T_P} = 3450 \cdot \frac{252}{3600} \cdot \frac{4}{6} = 161 \text{ Wh} \quad (20)$$

Očekávaný počet pulsů EM na impulsním výstupu pro AP+ vypočítaný na základě energie dodané kalibrátorem:

$$i = \frac{A_{P+}}{K_{EM}} = \frac{161}{4} = 40,25 \cong 40 \quad (21)$$

EM naměřil počet impulsů dodávky = 20, naměřené pulzy odběru = 0

### Poznatky z testů:

Z testů č. 1 až 3 vyplývá, že zkoumaný elektroměr se chová jako by měl pro vyhodnocení dvě časová okna  $T_w$ .  $T_{w1}$  má délku 1 s a slouží k přesnému měření energie, které se ukládá do paměťových registrů (viz kap. 6.3.2).  $T_{w2}$  má délku v řádu jednotek sekund (zřejmě větší než 6 s) a slouží ke generování metrologických impulsů (LED + impulsní výstup). Pokud tedy střídání režimů odběr dodávka probíhá rychleji než v řádech desítek sekund, může dojít k jevu, že údaj o energii naměřené elektroměrem signalizovaný impulsními výstupy či LED neodpovídá energii, kterou elektroměr skutečně naměřil a uložil do registrů.

### Rozbor chování impulsních výstupů elektroměru

Elektroměr měří po stanovené časové okno  $T_w$  (experimenty byla vyhodnocena délka  $T_w = 1$  s, viz kap. 6.3.2). Během tohoto intervalu je integrována energie. Po uplynutí časového okna  $T_w = 1$  s, dojde k vyhodnocení, zda se jedná o dodávku nebo odběr. Podle toho se přičte naměřené kvantum energie do registru pro dodávku (na obr. 23 označen reg.  $A_{P+}$ ) či odběr (reg.  $A_{P-}$ ), kde se přičte ke stávajícímu stavu registru.

Zároveň se toto kvantum energie podělí impulsní konstantou (4Wh na 1 impuls) a vyšle se impuls v případě, že výsledek celočíselného dělení není roven nule. Zbytek po dělení (kladný či záporný) se algebraicky přičte k registru, který je zřejmě společný pro kladnou i zápornou energii. V případě, že dochází k rychlému přepínání směru toku výkonu, je zbytek v registru neustále přemazáván (přičítáme stejnou kladnou a stejnou zápornou energii). Proto, i když se registry  $A_{P+}$  a  $A_{P-}$  inkrementují, LED dioda neblíká a nereaguje impulsní výstup. Tento popis je ale pouze teoretický, vychází z naměřených poznatků. Pro lepší názornost následuje příklad s konkrétními hodnotami.

### Příklad:

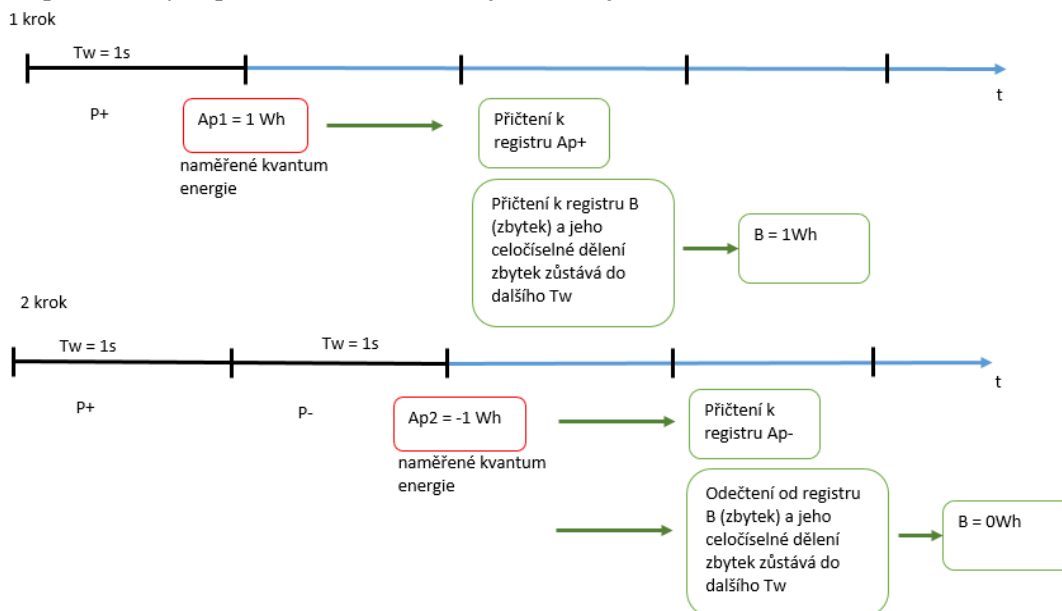
#### Krok 1:

Po dobu jednoho časového okna  $T_w$  o délce 1 s, byla naměřena  $A_{p1} = 1 \text{ Wh}$ . Ta se tedy přičetla k registru  $A_{p+}$ . Impulsní konstanta je  $4 \text{ Wh} (250 \text{ imp/kWh})$ . Proto je výsledek dělení naměřeného kvanta energie  $A_{p1}$  roven nule impulsů a zbytek je  $1 \text{ Wh}$ . Tento zbytek se přičte do zbytkového registru označeného jako B.

#### Krok 2:

V dalším  $T_w$  dojde ke změně toku energie a naměřené kvantum energie  $A_{p2}$  bude mít hodnotu  $-1 \text{ Wh}$ . Ta se tedy přičetla k registru  $A_{p-}$ . Tento zbytek se algebraicky přičte do zbytkového registru označeného jako B. Protože energie je záporná dojde k jejímu odečtení. Stav registru B se tedy změní z  $+1 \text{ Wh}$  na nulu a po jeho celočíselném dělení je stále zbytek nula a je generováno nula impulsů.

Je tedy zřejmé, že budou-li se tyto dva stavy neustále opakovat, bude docházet k pravidelnému nárůstu registrů odběru  $A_{p+}$  a dodávky  $A_{p-}$  a přitom nebudou doprovázeny žádným bliknutím diody ani reakcí impulsního výstupu. Tuto situaci nastiňuje následující obrázek:



Obr. 23 Schéma experimentálně zjištěného chování elektroměru

### Test 3:

Tento test slouží k ověření, od kdy začnou impulsní výstupy EM reagovat na naměřenou energii. Při testu byly zvětšovány délky  $T_O$  a  $T_D$ .

$$U = 230 \text{ V}, I = 7 \text{ A}$$

Příkon

$$P = 3 \cdot U \cdot I = 3 \cdot 230 \cdot 7 = 4830 \text{ W} \quad (22)$$

$K_{EM} = 4 \text{ Wh}$  udává kvantum energie potřebné pro odeslání 1 impulsu na impulsní výstup

Při znalosti  $P$  lze stanovit, jak dlouho musí být výkon odebírán, aby došlo k vygenerování 1 impulsu.

$$t = \frac{K_{EM} \cdot 3600}{P} = \frac{4 \cdot 3600}{4830} = 2,98 \text{ s} \quad (23)$$

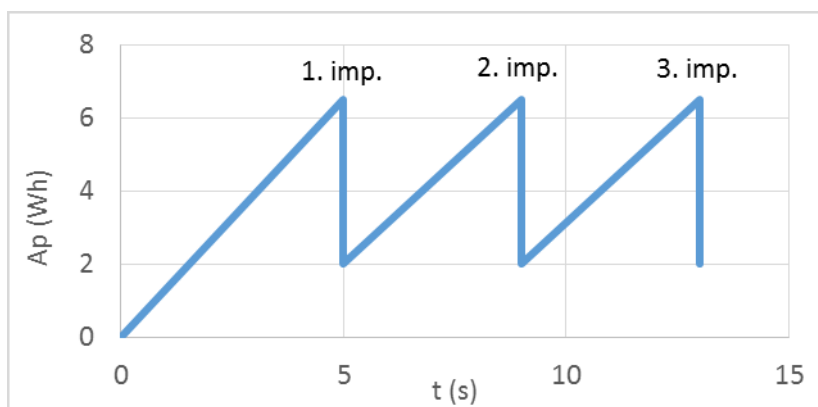
Při  $I = 7 \text{ A}$  ( $P = 4830 \text{ W}$ ) a při rovnosti  $T_O = T_D = 3 \text{ s}$  by měly být generovány EM impulsy, (hraniční hodnota).

Při praktickém měření se ale ukázalo, že impulsní výstupy reagovaly až při časech  $T_O = T_D = 5 \text{ s}$ . Při časech 4,5 s ještě nereagovaly. Z toho plyne že, elektroměr zřejmě obsahuje integrační člen, který generuje impulsní výstup až při překročení hodnoty kolem 6 Wh dodávky nebo odběru. Toto chování ozřejmují následující obrázky (jedná se pouze o teoretický předpoklad stanovený na základě naměřených výsledků):

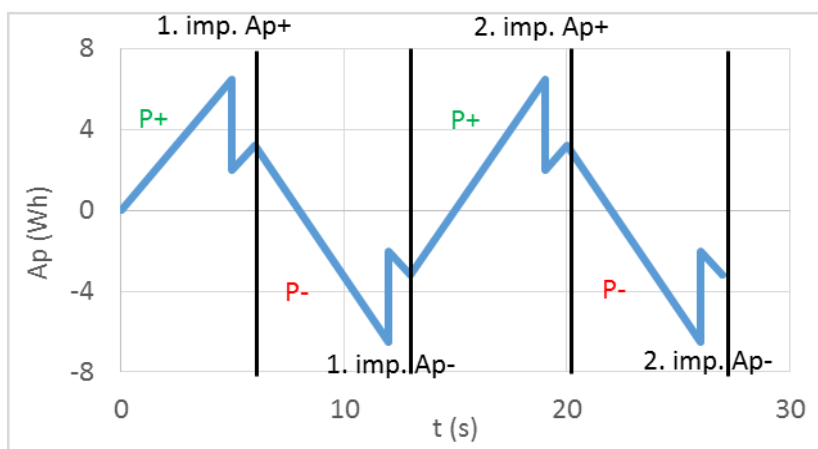
Na obr. 24 je znázorněn průběh energie v registru pro odesílání metrologických pulzů během trvalého odběru energie. Integrovaná hodnota klesne po odeslání impulsu o 4Wh, protože je to konstanta impulsního výstupu.

Na obr. 25 je znázorněn průběh energie v registru pro odesílání metrologických pulzů během pomalých změn (perioda změn 12 s a více) mezi odběrem energie a dodávkou. Integrovaná hodnota klesne po odeslání impulsu o 4Wh, protože je to konstanta impulsního výstupu. Vertikální černé čáry v grafu znázorňují změnu toku výkonů (dodávka/odběr).

Na obr. 26 je znázorněn průběh energie v registru pro odesílání metrologických pulzů během rychlých změn (příklad s periodou změn 6 s) mezi odběrem energie a dodávkou. Vertikální černé čáry v grafu znázorňují změnu toku výkonů (dodávka/odběr). Nejsou generovány žádné metrologické pulzy, viz test č. 2 v této kapitole.

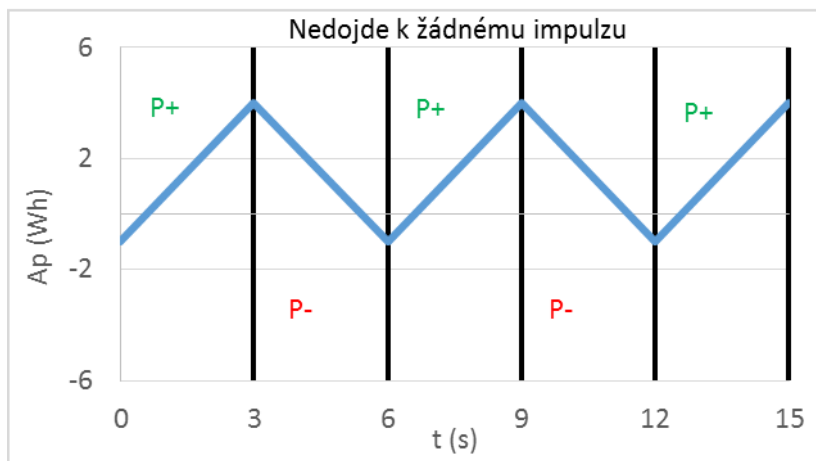


Obr. 24 Energie v závislosti na čase, trvalý odběr



Obr. 25 Energie v závislosti na čase, pomalé střídání mezi odběrem a dodávkou energie





Obr. 26 Energie v závislosti na čase, rychlé střídání mezi odběrem a dodávkou energie

### Závěr z testování

Za těchto okolností nelze provádět automatizované testování měřicího okna  $T_w$  za použití metrologické LED nebo impulsního výstupu. Je nutné použít například IR čtecí hlavu, jako tomu bylo v kapitole 6.3 a vyčítat stav vnitřních registrů elektroměru.

## 7. Testování funkce WR Greenbono a jeho vlivu na flickr v síti

Tato kapitola se zabývá podrobným popisem konkrétního WR, a totiž Greenbono od firmy Yorix s. r. o [6]. Níže je podrobně rozebrána funkce regulace přebytků elektrické energie.

Při testech v této kapitole byly použity následující přístroje:

Zdroj napětí a proudu – kalibrátor CMC 256plus

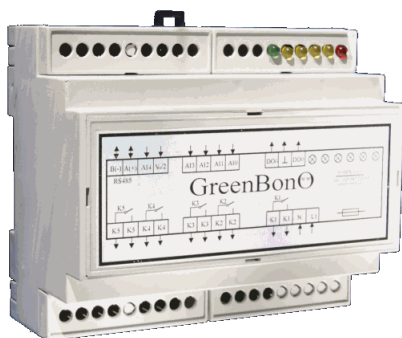
Kontrola správnosti měření – cDAQ 9188

Moduly v zařízení cDAQ - NI 9225 (300 V rms), NI 9239 ( $\pm 10$  V)

Převod  $I$  na  $U$  – proudové kleště

Wattrouter – Greenbono

Elektroměr pro testy v kap. 7.2 – EM4 (pro popis EM viz kap. 6)



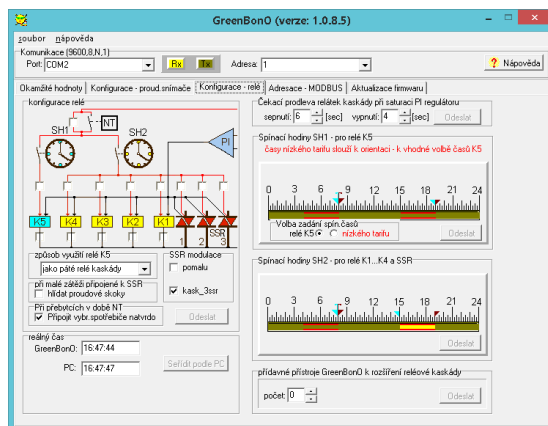
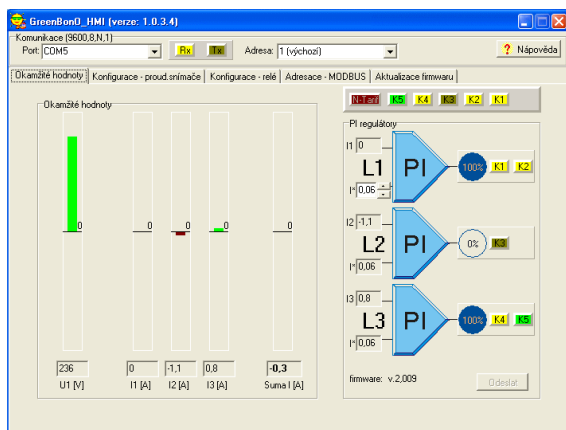
Obr. 27 WR Greenbono

### 7.1 Popis chování wattrouteru Greenbono

Greenbono [6] měří napětí napájecí fáze. Podle ní odhaduje velikost napětí na zbylých dvou fázích. Proud je měřen ve všech třech fázích. Každá fáze je regulovaná zvlášť vlastním PI regulátorem. Pro spínání spotřebičů je Greenbono opatřen pěti relé K1 – K5, které slouží pouze k dvoustavovému ovládání zátěže, a třemi digitálními výstupy, které slouží pro řízení externích SSR (solid-state relay) a umožňují řídit míru spotřeby pomocí PWM spínání. Řízení PWM není synchronizované s měřeným napětím. Proto je potřeba, aby externí SSR byly vybaveny funkcí spínání v nule, aby se omezily proudové rázy a flickr. Rozdělení spínacích prvků pro dané fáze je následující:

K fázi L1 přísluší PWM1 (DO0), K1 a K2. K fázi L2 přísluší PWM2 (DO6) a K3. K fázi L3 přísluší PWM3 (AI1), K4 a K5.

K WR Greenbono je od výrobce dodávána aplikace **Greenbono HMI**. Umožňuje sledování jeho parametrů v reálném čase a zároveň některé parametry nastavovat. Je volně dostupná na stránkách výrobce [22].



Obr. 28 Interface aplikace dodávané výrobcem WR

K podrobnému otestování regulační funkce WR Greenbono byla vytvořena aplikace v LabVIEW, která využívá kalibrátor CMC 256plus jako říditelný zdroj pro simulování různých stavů v síti. Zároveň využívá šasi cDAQ NI 9225 s moduly NI 9225 (300 V rms), NI 9239 ( $\pm 10$  V) pro měření napětí a proudu přes proudové kleště. Aplikace po spuštění aktivuje automatické generování napětí 230 V na všech třech fázích. Během toho umožňuje nastavovat hodnoty proudů v jednotlivých fázích. K tomuto účelu slouží ovládací prvky v oblasti A na obr. 30. Pokud je zadána kladná hodnota proudu, je proud generován ve fázi s napětím a jedná se o odběr energie z distribuční soustavy. Pokud je zadána záporná hodnota proudu, je proud generován s opačnou fází než napětí a jedná se o dodávku energie. Aplikace zároveň měří pomocí cDAQ zařízení aktuální průběhy proudu, napájecího napětí a napětí na PWM výstupech WR a zobrazuje je do grafů, které jsou v oblasti C obr. 30. Tím byla zajištěna zpětná kontrola. Dále měří periody spínání jednotlivých PWM výstupů WR a zaznamenává je do pole v oblasti D. V oblasti B jsou zobrazeny nejdelší naměřené periody spínání za dobu běhu programu a je zde umístěno tlačítko pro jejich reset během testování. S použitím této aplikace byla určena maximální doba periody PWM výstupu při aktivní regulaci.



Obr. 29 Zařízení cDAQ a proudové kleště



Obr. 30 Čelní panel aplikace pro testování funkce WR s vyznačenými oblastmi A, B, C, D

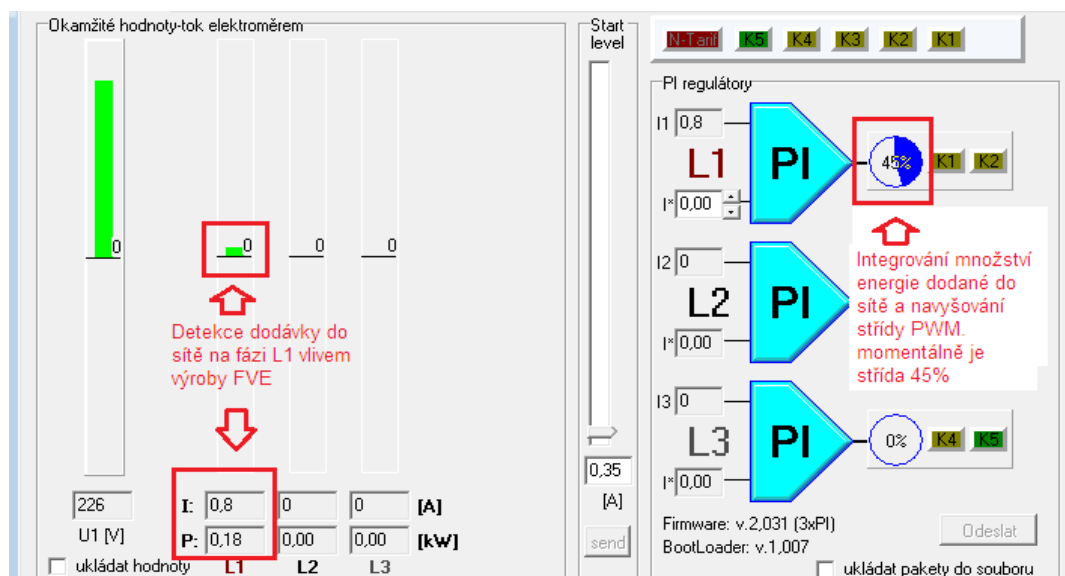
V kombinaci s aplikací od výrobce WR (popsanou výše v této kapitole) bylo provedeno podrobné testování způsobu regulace WR. Níže jsou zjištěné informace.

### Popis priority spínání

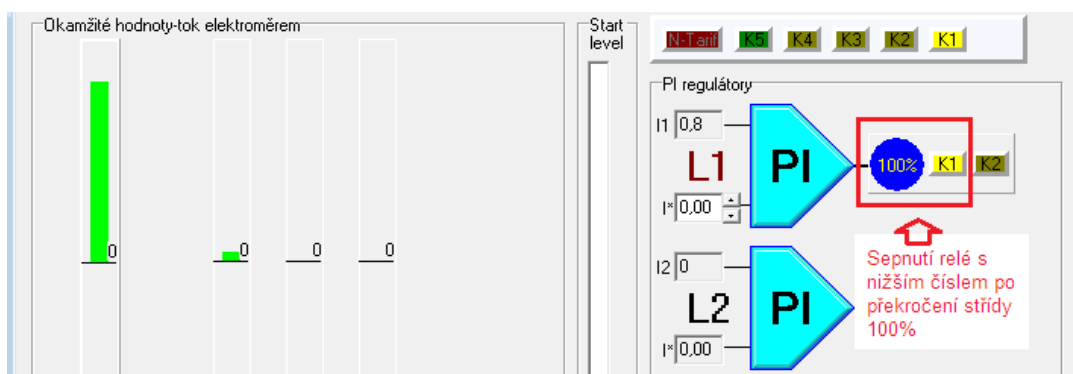
Každá fáze má vlastní regulační člen založený na PI regulátoru. Ten v případě toku energie do distribuční soustavy začne tuto energii integrovat. S rostoucí velikostí integrační složky začne růst i střída PWM signálu řídicího SSR, viz obr. 31. V případě nastolení rovnováhy v síti (přetok = 0) je střída PWM konstantní (respektive osciluje kolem konstantní hodnoty). Pokud střída PWM dosáhne 100% a stále přetéká energie do distribuční soustavy, dojde po zvoleném časovém intervalu k sepnutí relé s nižším pořadovým číslem, viz obr. 32. Pokud ani to nepomůže, je sepnuto další relé (pokud je k dispozici).

Jakmile dojde následně k překročení spotřeby energie nad dodávkou, začne Greenbono nejprve snižovat střidu PWM, viz obr. 33. Pokud střída PWM klesne na nulu a stále je detekován odběr z distribuční soustavy, dojde po zvoleném časovém intervalu k vypínání relé, viz Obr. 34. Nejprve se vypíná to s vyšším pořadovým číslem a potom to s nižším. Toto chování bylo ověřeno praktickým experimentem.

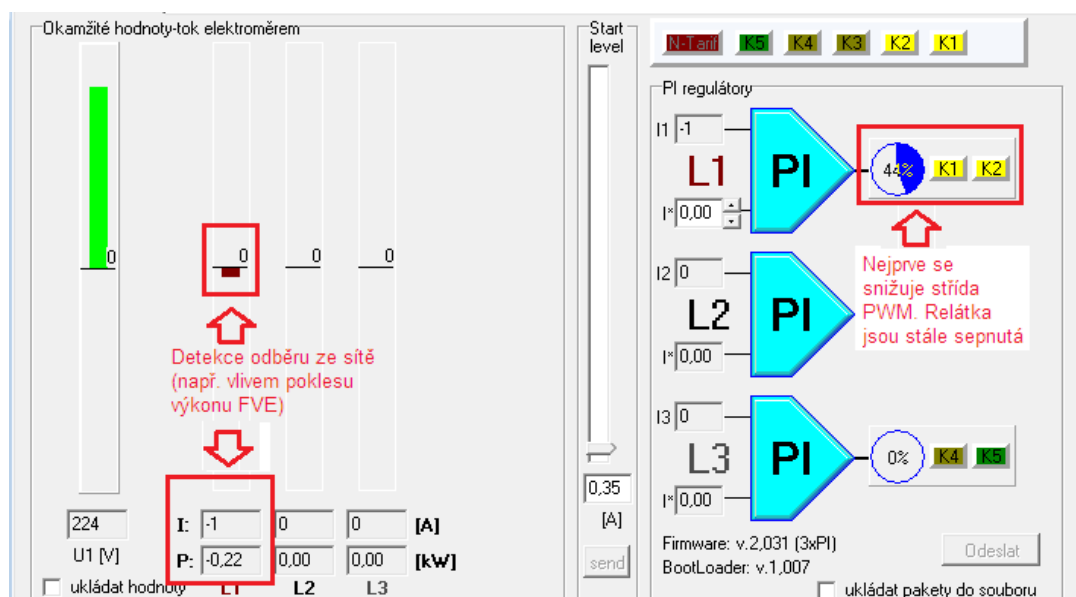
Níže jsou uvedené snímky uživatelského rozhraní WR Greenbono, které byly pořízeny během testování a zachycují situace popsané výše. Děj se odehrává na fázi L1.



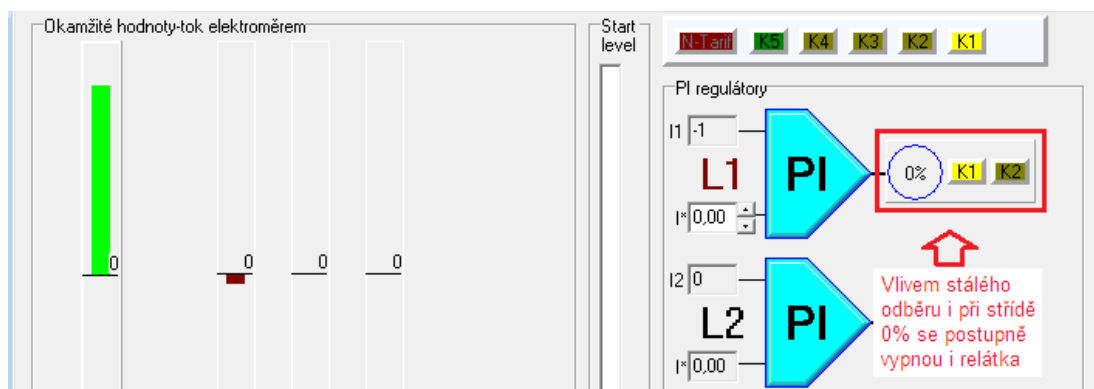
Obr. 31 snímek z aplikace Greenbono HMI, nárůst střidy PWM



Obr. 32 snímek z aplikace Greenbono HMI, zapínání relé



Obr. 33 snímek z aplikace Greenbono HMI, snižování střidy PWM



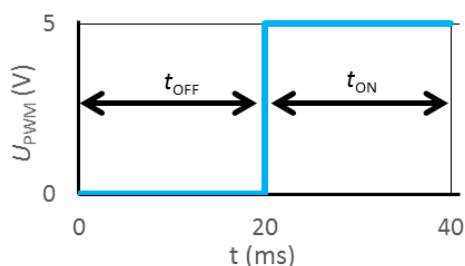
Obr. 34 snímek z aplikace Greenbono HMI, vypínání relé

U výstupů s PWM signálem pro řízení SSR byly testováním zjištěny parametry potřebné pro test v kap. 7.3. Testování probíhalo na fázi L1. Při nominálním napětí 230 V se proudem ve fázi s napětím simuloval odběr energie, aby se PI regulátor pro danou fázi dostal na nulovou hodnotu. Na PWM výstupu byl trvale signál OFF (úroveň 0 V). Potom bylo spuštěno generování malého proudu s opačnou fází čímž se docílilo simulace dodávky energie. Po krátké době začal PI regulátor ve vizualizaci signalizovat střidu 1% a generovat na PWM výstupu periodický signál. Následně byl proud ve fázi nastaven na nulovou hodnotu, aby se střida nezvětšovala. Testovací aplikací byla změřena délka periody při minimální střídě. Perioda při maximální střídě se zjistila analogicky opačným postupem.

Nejprve se simulací velké dodávky energie PI regulátor nastavil do hodnoty 100%, aby byl na výstupu PWM trvale spínací signál ON (úroveň 5 V). Potom se začal generovat malý proud ve fázi s napětím, který simuloval odběr. Po krátké době klesla hodnota PI regulátoru na 99% a na PWM výstupu začal být generován periodický signál. Velikost generovaného proudu byla následně nastavena na nulovou hodnotu a byla změřena délka periody.

### Experimentálně zjištěné parametry výstupů PWM

PWM výstupy pro řízení SSR mají střidu 0,78% až 99,22%, jinak se již jedná o stavy trvale sepnuto (úroveň 5 V) a trvale vypnuto (úroveň 0 V). Tvar signálu je obdélníkový a každý stav (ON/OFF) trvá minimálně 20 ms (kvůli délce periody napájecího napětí). Minimální perioda je tedy 40 ms (v případě střidy 50% - 5 V s trváním  $t_{ON} = 20$  ms a 0 V s trváním  $t_{OFF} = 20$  ms). Maximální perioda byla experimentálně stanovena na hodnotu 2,56 s (5 V s trváním  $t_{ON} = 20$  ms a 0 V s trváním  $t_{OFF} = 2,54$  s a naopak).



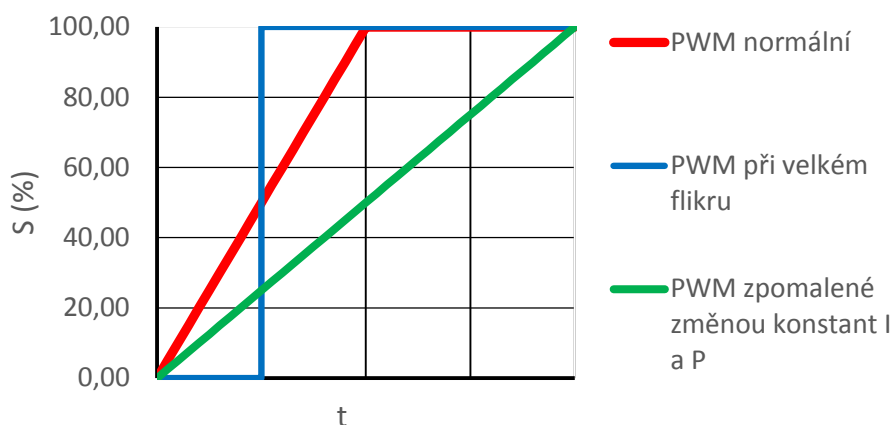
Obr. 35 PWM výstup WR při střídě 50%

### PI regulátor

Výrobce WR Greenbono umožňuje v případě velkého flikru způsobeného na síti s velkou zkratovou impedancí zapnout funkci tzv. pomalého spínání SSR. Při testech bylo zjištěno, že při aktivaci této funkce se velmi urychlí integrační proces PI regulátoru a PWM výstup pro ovládání SSR se začne chovat jako dvoustavové relé (PWM 0% nebo 100%).

Výrobce dále umožňuje z důvodu snížení flikru změnit nastavení P a I konstanty regulátoru. V návodu doslovně uvádí: „Zmenšovaniu integrační konstanty zpomaluje přepínání – snižuje se flikr“. Předtím výrobce uvádí, že zpomalováním má na mysli prodlužování dob stavů vypnuto a zapnuto. Při následném experimentu bylo zjištěno, že zvyšováním této konstanty se pouze dosáhne zpomalení nárůstu a poklesu střídý PWM. Nijak se ale nezmění délky časů zap/vyp v případě spotřebiče připojeného na SSR. O změně délky časů stavů zap/vyp můžeme tedy hovořit jen v případě relé výstupů, které jsou spínány jen v případech saturace PWM výstupů. A ty se podílejí na vzniku flikru v mnohem menší míře s hlediska četnosti spínání než spotřebiče připojené přes SSR na PWM výstup.

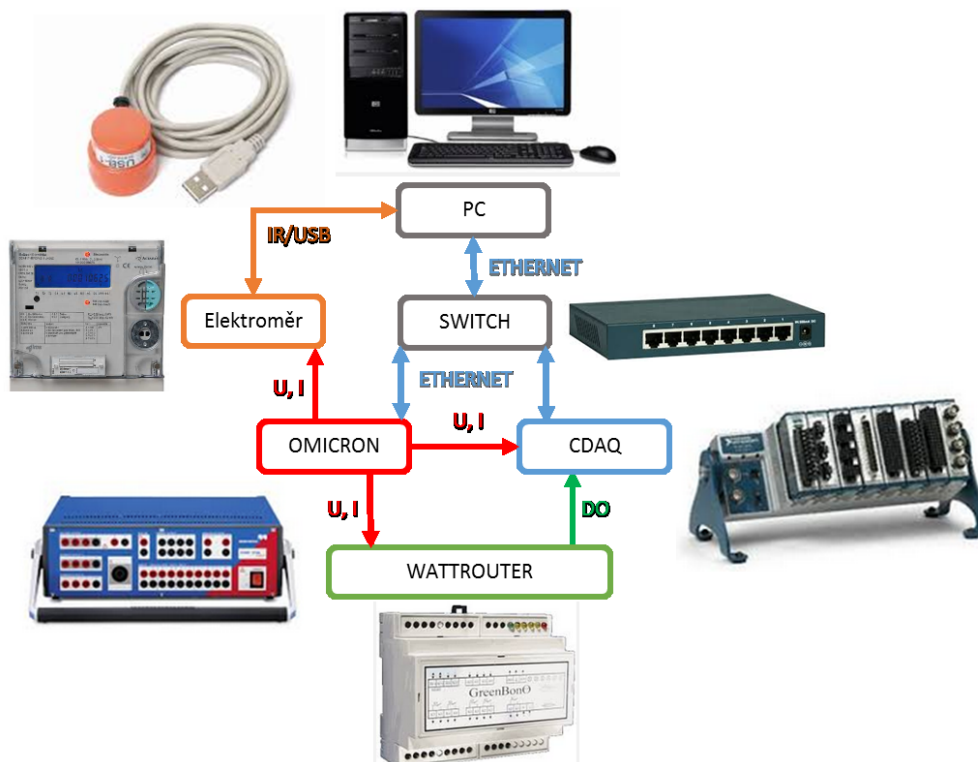
Výsledek změn parametrů regulace je na obr. 36. Jedná se o závislost střídý PWM výstupu na době přetékání energie do distribuční soustavy. Obrázek je pouze přibližný, časová osa není v měřítku.



Obr. 36 Porovnání závislosti střídý PWM výstupů na době přetékání energie do distribuční soustavy

## 7.2 Testování dopadů Greenbona na flikr

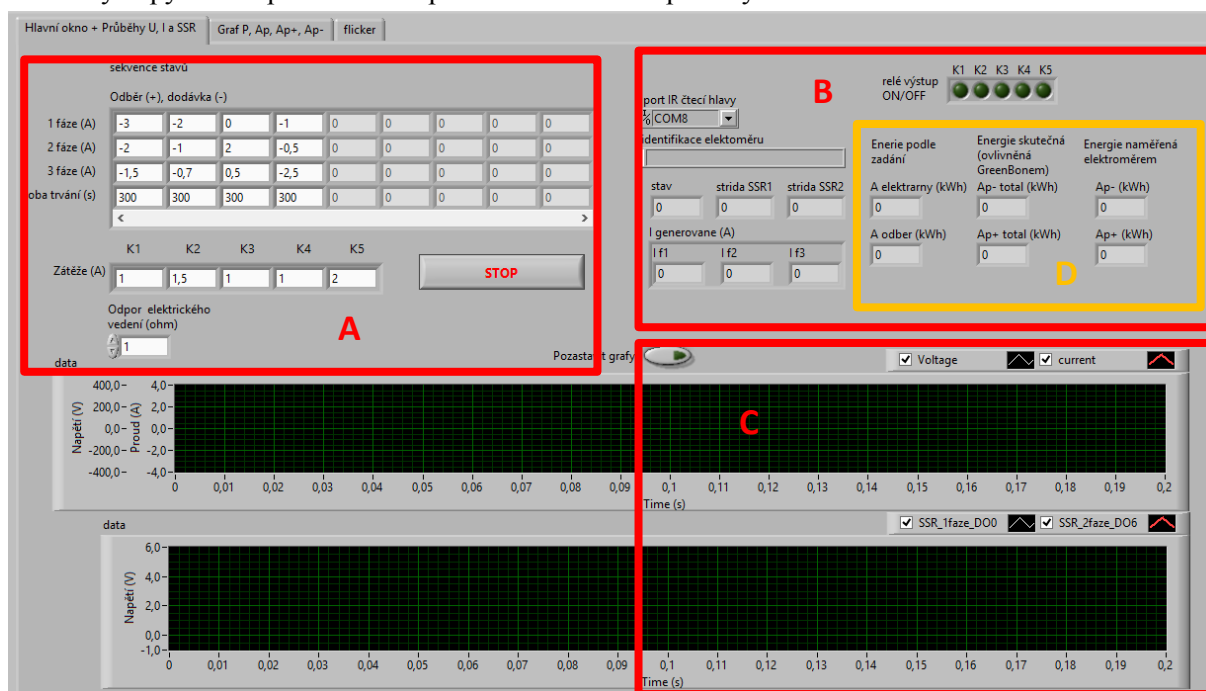
Popis testování: pomocí kalibrátoru CMC 256plus byly simulovány podmínky v domácí síti s FVE. Spínací výstupy WR nespínaly skutečnou zátěž. Místo toho byly připojeny do měřicí karty s napěťovými vstupy. Kalibrátor i měřicí šasi cDAQ s měřicími moduly komunikují s řídicím PC prostřednictvím Ethernetového rozhraní. Na řídicím PC je spuštěna aplikace vytvořená v prostředí LabVIEW, která řídí celý proces. Aplikace řídící kalibrátor simuluje předem dané stavy v síti. Podle toho jak WR zapínal digitální výstupy, aplikace simulovala změnu proudu vlivem připojení virtuální zátěže. Veškeré testování tedy probíhalo bez jakýchkoli zátěžových prvků. Veškeré testování rovněž probíhalo pouze v oblasti harmonických průběhů s pouze činnou zátěží.



Obr. 37 Schéma propojení jednotlivých prvků, při testování WR s možností využití virtuální instrumentace

### 7.2.1 Testování regulace pouze pomocí relé výstupů K1 – K5

Pro testování regulace prováděné relé výstupy K1 – K5 byla vytvořena aplikace v LabVIEW. PWM výstupy řídící spínání zátěže přes SSR se zde neuplatnily.



Obr. 38 Čelní panel aplikace s vyznačenými oblastmi A, B, C, D



Do aplikace na řídicím PC se zadává chování domácí sítě prostřednictvím tabulky v **oblasti A** na Obr. 38. Tato tabulka je pro přehlednost uvedena níže.

**Tab. 15 Časová sekvence stavů v domácí síti**

stav	1.	2.	3.	4.
Doba trvání (s)	$t1$	$t2$	$t3$	$t4$
1 fáze (A)	$I_{L1}$	$I_{L1}$	$I_{L1}$	$I_{L1}$
2 fáze (A)	$I_{L2}$	$I_{L2}$	$I_{L2}$	$I_{L2}$
3 fáze (A)	$I_{L3}$	$I_{L3}$	$I_{L3}$	$I_{L3}$

Každý sloupec definuje jeden stav. V každém stavu je definována hodnota proudu v každé fázi a jeho směr (+dodávka, -odběr). Každý stav je definován po určitý čas, který se zadává do řádku doba trvání. Pokud je proud v tabulce zadán kladně, znamená to, že se jedná o odběr z distribuční soustavy do spotřebičů, energie se v domácnosti spotřebovává (proud je ve fázi s napětím). Pokud je proud v tabulce zadán záporně, znamená to, že se jedná o dodávku do distribuční soustavy z FVE, energie přetéká do distribuční soustavy (proud je posunut o  $180^\circ$  oproti napětí). Napětí se nezadává a je automaticky 230 V v každé fázi. Lze tedy definovat libovolný počet stavů s proměnlivou délkou trvání. Změny stavů simulují změny ve skutečné síti. Pokud je proud zadán záporně znamená to, že FVE vyrábí více energie, než se v domácnosti spotřebovává a proto energie přetéká do distribuční soustavy. Pokud je proud zadán kladně znamená to, že FVE vyrábí méně energie, než se spotřebovává v domácnosti a energie je proto odebíraná z distribuční soustavy.

Do aplikace se následně zadává proudový odběr spotřebičů spínaných relé výstupy K1 - K5 WR, viz **oblast A** v obr. 38. (zátěže jsou pouze simulovány, nejsou připojeny fyzicky). Stav relé jsou monitorovány (zelené LED indikátory v oblasti B v obr. 38) a v případě, že WR nějakou zátěž sepne, je proud ve fázi následně zmenšen o danou hodnotu proudu zátěže. Pokud ji naopak vypne, je zase proud navýšen.

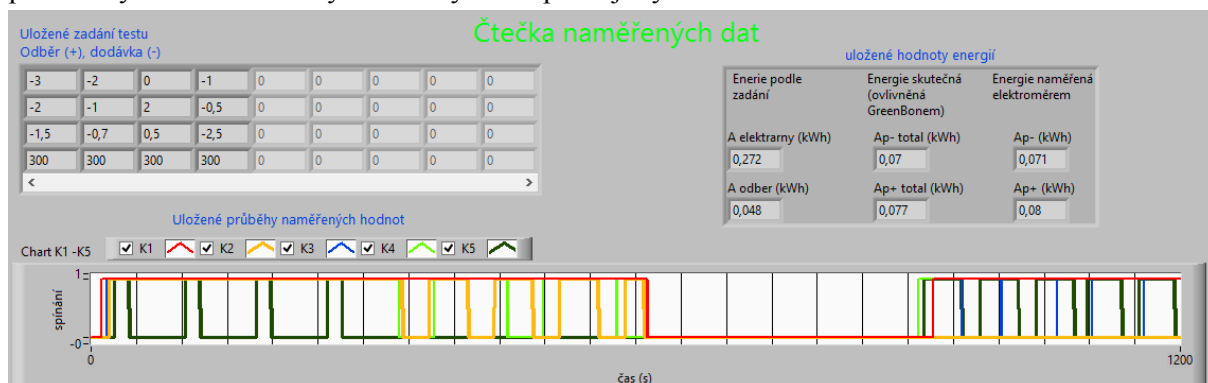
Z důvodu výpočtu úbytků napětí v domácnosti při regulaci WR se zadává ještě velikost zkratové impedance v místě nasazení v jednotkách Ohmu, viz **oblast A** v obr. 38.

**V oblasti B** v obr. 38 jsou uživateli zobrazeny údaje o načtené identifikaci testovaného EM, velikosti právě generovaných proudů, aktuální měřené stavy relé výstupů WR (zelené LED signalizující stavy ON/OFF),

**V oblasti C** v obr. 38 jsou grafy s měřenými průběhy proudu a napětí z generátoru CMC 256plus a průběhy napětí na PWM výstupech (nepodílejí se na regulaci v tomto testu).

Následuje vysvětlení prvků **v oblasti D** v obr. 38. Testovací aplikace nejprve vyhodnotí ze zadaných hodnot stavů sítě (tabulka v oblasti A), kolik energie by přeteklo do distribuční soustavy a kolik by se naopak z ní spotřebovalo bez použití WR ještě než se začne cokoliv generovat. Tyto hodnoty se zobrazí v numerických indikátorech ve sloupci **Energie podle zadání**. Potom je spuštěno generování  $U$  a  $I$  v testovacím obvodu a měří se, kolik energie se skutečně dodalo a odebralo z distribuční soustavy při regulaci prováděné WR. Tyto hodnoty energie se zobrazí v indikátorech ve sloupci **Energie skutečná**. Na základě těchto údajů lze vyhodnotit kvalitu regulace. Nakonec aplikace pomocí USB/IR rozhraní vyčte z EM4 údaj o jeho naměřené energii, jak odebrané tak dodané, která se naakumulovala během testování. Tyto hodnoty energie se zobrazí v indikátorech ve sloupci **Energie naměřená elektroměrem**.

Aplikace během testování zachycuje průběhy několika veličin a zaznamenává je do historických trendů. Tyto data jsou během měření zaznamenávány také do binárního souboru, ze kterého se dají pomocí vyvinuté SW čtečky naměřených dat později vyčíst.



Obr. 39 Část čelní panelu čtečky

Níže je ukázka naměřených dat konkrétního testu:

#### Zadané parametry pro test:

Tab. 16 sekvence stavů (záporný proud – představuje dodávku energie, kladný proud – představuje odběr energie z distribuční soustavy)

stav	1.	2.	3.	4.
Doba trvání (s)	300	300	300	300
1 fáze (A)	-3	-2	0	-1
2 fáze (A)	-2	-1	2	-0,5
3 fáze (A)	-1,5	-0,7	0,5	-2,5

Tab. 17 Velikost spotřeby proudu virtuálních zátěží spínaných přes relé WR

Relé spínač	K1	K2	K3	K4	K5
Proud zátěž (A)	1	1,5	1	1	2

Velikost zkratové impedance  $1\Omega$ .

Celková doba trvání testu 1200 s

#### Výstupní hodnoty testu, součet všech tří fází

**Energie podle zadání** (bez použití WR, stanoveno početně) – dodávka = 272 Wh, odběr = 48 Wh

**Energie skutečná** (s použitím WR, naměřeno) – dodávka = 70 Wh, odběr = 77 Wh

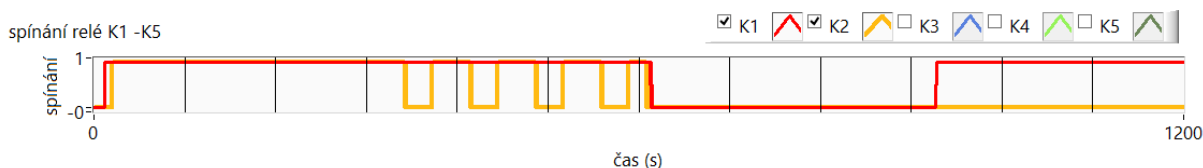
**Energie naměřená elektroměrem** – dodávka = 71 Wh, odběr = 80 Wh

Vlivem regulace WR nebylo do distribuční sítě dodána celá energie 272 Wh vyrobená FVE, ale pouze 70 Wh. Rozdíl 202 Wh byl spotřebován při napájení akumulačních spotřebičů řízených reléovými výstupy WR. Vlivem nedokonalosti regulace (např. časové prodlevy WR na změny podmínek v domácí síti) spotřebiče ovládané WR spotřebovaly 29 Wh energie z distribuční soustavy. Hodnota této energie je dána rozdílem energie odběru podle zadání (vypočítané na základě tabulky stavů v zadání testu, viz. tab. 16), která činí 48 Wh a energie skutečného odběru, která činí 77Wh.

Množství energie naměřené elektroměrem téměř odpovídá skutečnému stavu. Potvrzuje to závěr, že relé výstupy, které jsou spínány na delší časové intervaly, nepředstavují pro statický EM z hlediska Tw problém.

## Grafy

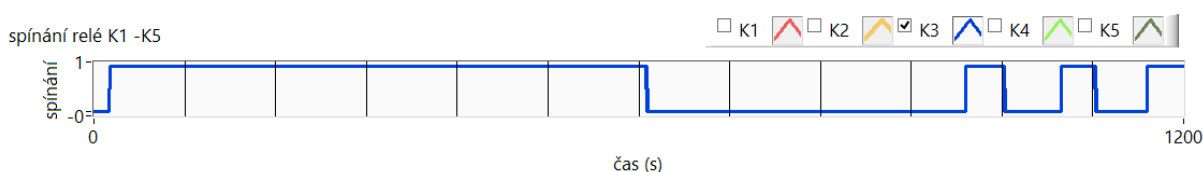
**Spínání relé K1 – K5** zobrazuje spínání relé K1 – K5 (a tím i zátěží, které jsou jimi řízeny) v závislosti na čase (měřené hodnoty). Relé K1 a K2 slouží k regulaci v L1, relé K3 slouží k regulaci v L2, relé K4 a K5 slouží k regulaci v L3. Nejsou použity PWM výstupy pro spínání přes SSR.



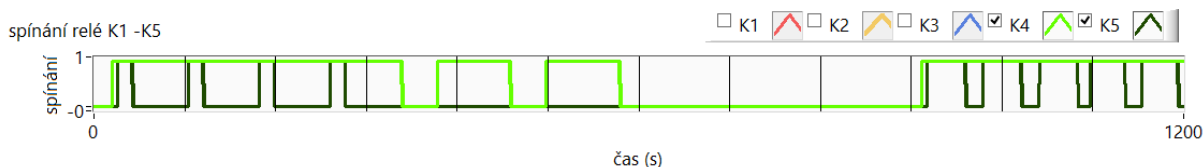
**Obr. 40** Průběh spínání zátěží na L1 přes relé K1 a K2

Podle zadání stavů v síti (viz tab. 16) Produkovala FVE na L1 při prvním stavu dodávku do sítě proudem o velikosti 3 A (výkon 690 W) po dobu 300 s a při druhém stavu proudem 2 A (výkon 460W) po dalších 300 s. Zátěže řízené přes relé K1 a K2 měly proudový odběr 1 A a 1,5 A, viz tab. 17.

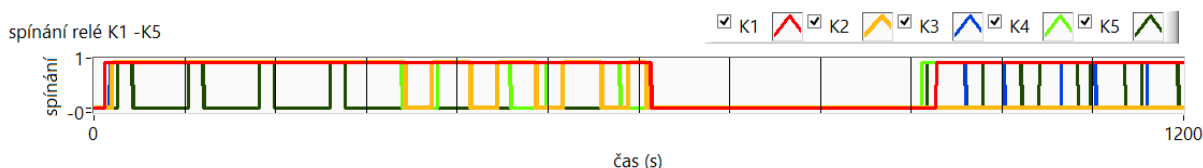
Z průběhu spínání relé K1 a K2 na obr. 40 je patrné, že krátce po začátku generování, byly oba relé sepnuty, protože proud v prvním stavu stále přetékal do distribuční sítě. Zátěže neměly dostatečně velký proudový odběr, aby spotřebovaly veškerý výkon z FVE. Ve druhém stavu od 300. do 600. sekundy se ale výkon FVE snížil, a to tak, že při sepnuté zátěži pouze na K1 proud byl dodáván do distribuční soustavy a při sepnuté zátěži K2 byl zase odebíráán z distribuční sítě. Proto bylo relé K1 stále sepnuto a relé K2 se zapínalo a vypínalo v čase mezi 300. a 600. sekundou.



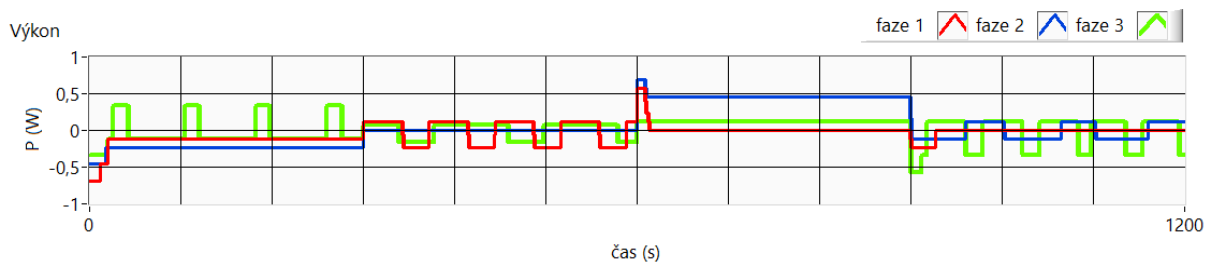
**Obr. 41** Průběh spínání zátěže na L2 přes relé K3



**Obr. 42** Průběh spínání zátěží na L3 přes relé K4 a K5

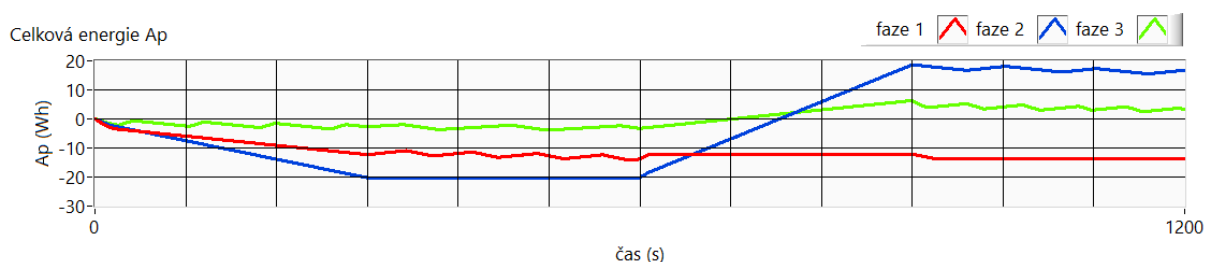


**Obr. 43** Všechny fáze dohromady, relé K1 – K5

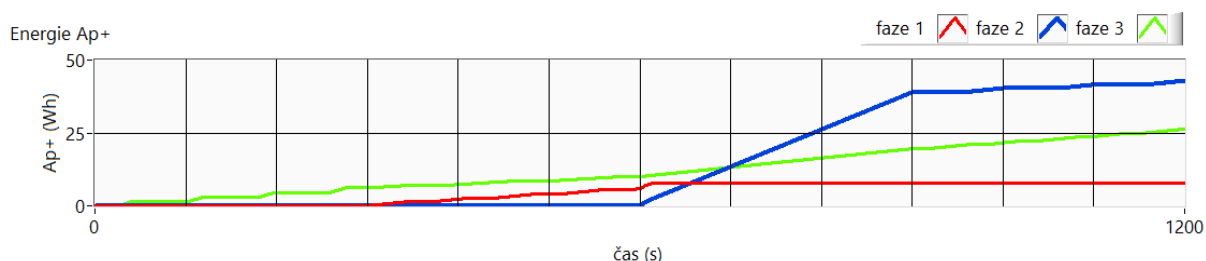


Obr. 44 Průběh výkonu v dané fázi v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného  $U$  a  $I$  v každé fázi)

Z průběhu výkonu v L1 (červená) na obr. 44 je patrné jak po dobu 1. stavu (prvních 300 sekund) byl výkon stále dodáván do distribuční sítě, protože zátěže na K1 a K2 neměly dostatečný proudový odběr. Ve 2. stavu (300 s – 600 s) je patrné jak tok výkonu osciloval v L1 kolem nuly vlivem spínání zátěže na K2.

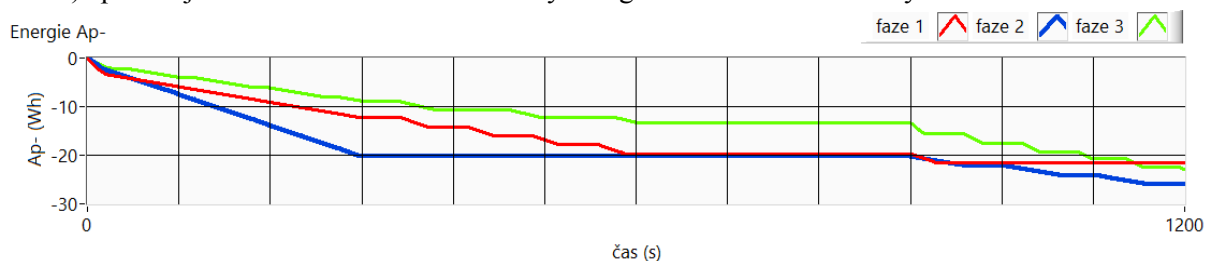


Obr. 45 Průběh celkové energie v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného  $P$ ; odebíraná energie se přičítá, dodávaná energie do distribuční sítě se odečítá)

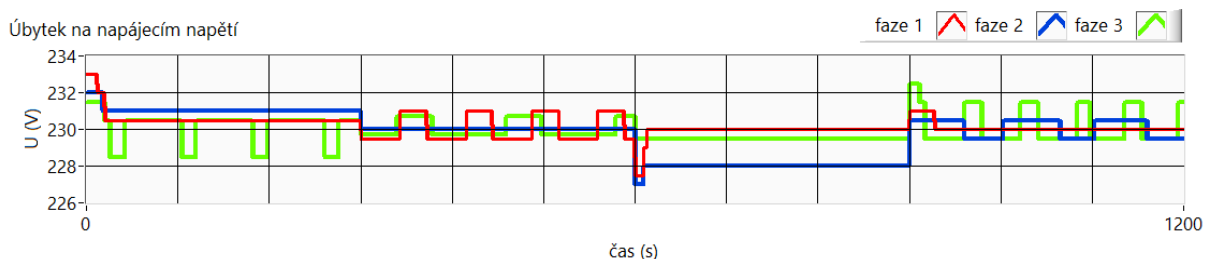


Obr. 46 Průběh energie odebírané z distribuční soustavy v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného  $P$ , poslední hodnota by měla odpovídat údajům  $A_{p+}$  naměřenému EM)

Z obr. 46 je patrné, jak nedokonalost ve formě dvoustavové regulace zátěže na K2 ve 2. stavu (300 s – 600 s) způsobuje na fázi L1 krátkodobé odběry energie z distribuční soustavy.



Obr. 47 Průběh energie dodávané do distribuční soustavy v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného  $P$ , poslední hodnota by měla odpovídat údajům  $A_{p-}$  naměřenému EM)



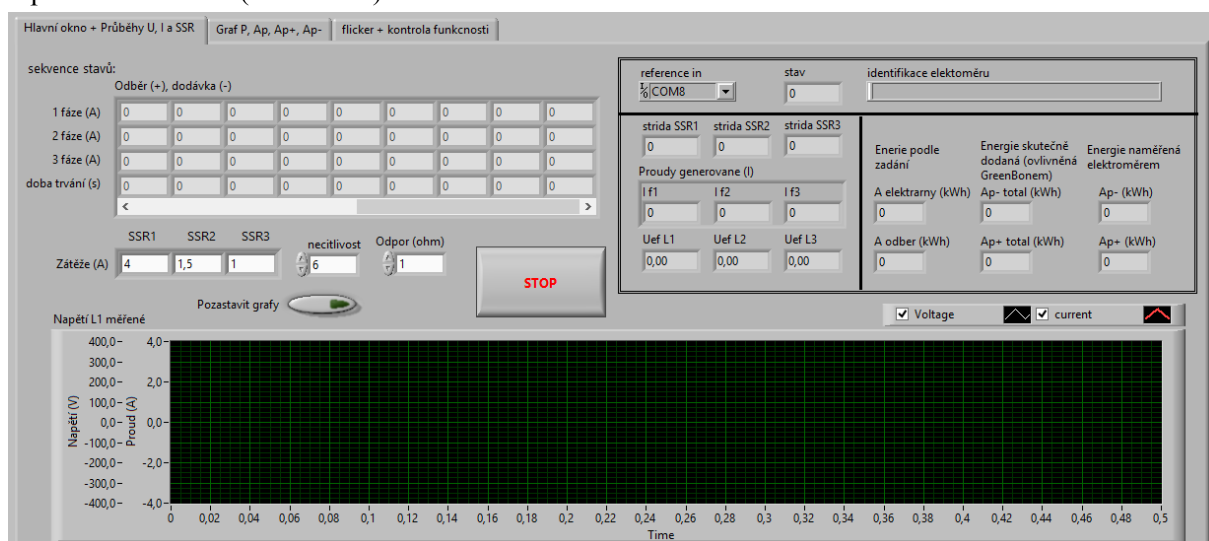
Obr. 48 Průběh napětí v domácnosti v závislosti na čase

Průběhy efektivní hodnoty napětí v obr. 48 jsou stanoveny výpočtem na základě právě generovaných proudů v testovacím obvodu a zadané velikosti zkratové impedance  $Z_K$ . Vzhledem k časové ose je patrné, že spínání zátěží probíhá v řádech sekund. Proto v této úloze nebylo realizované samotné měření flikru, které se dle ČSN 61000-4-15 [9] realizuje v rozmezí frekvencí spínání 0,5 Hz až 24 Hz.

### 7.2.2 Testování regulace pouze pomocí PWM výstupů pro řízení SSR

V tomto testu se na rozdíl od předchozího testu při regulaci neuplatňují relé výstupy WR, ale PWM výstupy pro řízení spínání zátěží přes SSR. Pro tento test byla vyvinuta podobná aplikace jako v předchozím testu, proto již zde nejsou jednotlivé prvky čelního panelu podrobně popsány jako v předchozí kapitole.

Do aplikace na řídicím PC se zadává chování domácí sítě prostřednictvím tabulky stejně jako v předchozím testu (viz tab. 16).



Obr. 49 Čelní panel aplikace

Do aplikace se následně zadává proudový odběr spotřebičů řízených přes SSR (zátěže jsou pouze simulovány, nejsou připojeny fyzicky). Stavy PWM výstupů WR pro řízení SSR jsou monitorovány a jsou z nich vypočítávány aktuální střidy na těchto výstupech. Velikost střidy spínání lineárně ovlivňuje velikost proudu řízené zátěže.

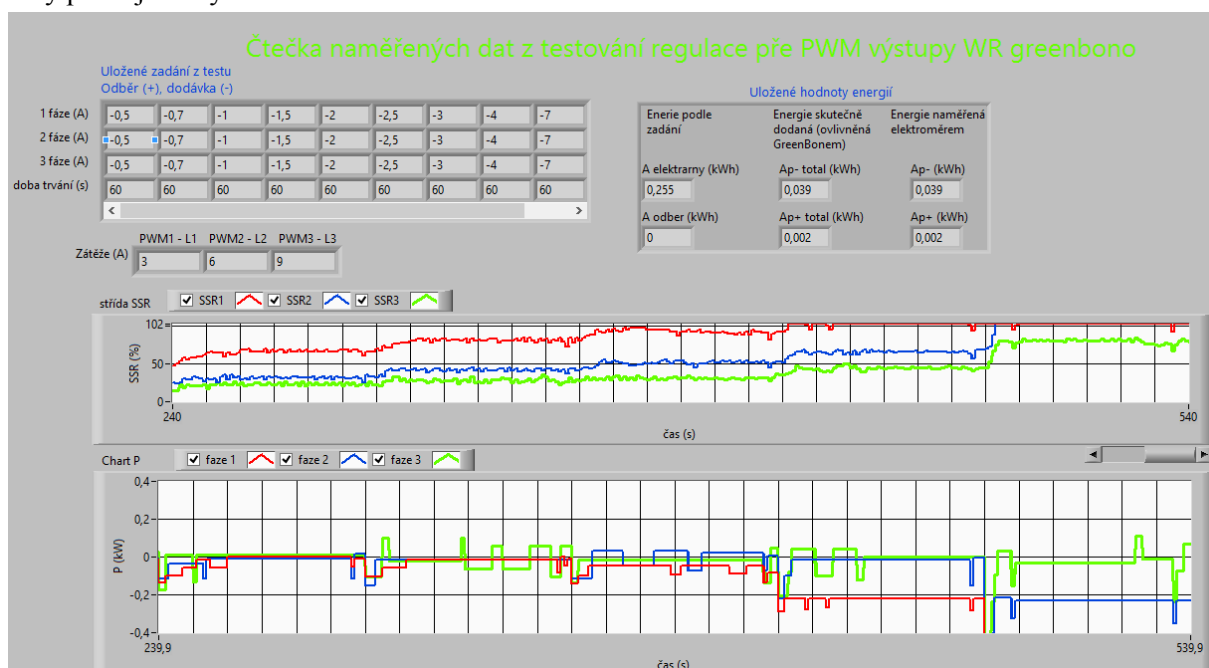
Příklad: Jestliže je proudový odběr zátěže řízené přes SSR1 5 A tak potom platí:

- Pro střidu na SSR1  $D_{SSR1} = 0\%$  má proud odebíraný řízenou zátěží hodnotu  $I_Z = 0$  A
- Pro střidu na SSR1  $D_{SSR1} = 50\%$  má proud odebíraný řízenou zátěží hodnotu  $I_Z = 2,5$  A
- Pro střidu na SSR1  $D_{SSR1} = 100\%$  má proud odebíraný řízenou zátěží hodnotu  $I_Z = 5$  A

Ostatní parametry jsou shodné jako v předchozím testu. Vliv zátěže připojené na PWM výstupy je pouze simulovaný.

Níže je ukázka naměřených hodnot dalšího testu. Test byl zaměřen na porovnání velikosti připojené zátěže na PWM výstupy WR z hlediska velikosti flikru. Na fázi L1 byla spínaná zátěž s nejnižším proudovým odběrem 3 A. Zátěž na fázi L2 měla proudový odběr 6 A. Na fázi L3 byla zátěž celkově s největším proudovým odběrem 9 A. Sekvence stavů v síti byla záměrně nastavena tak, aby se využil celý rozsah střidy PWM pro zátěž na fázi L1 a L2. Díky tomu bylo možné výsledky porovnat s hlediska flikru.

Veškerá data z měření byla rovněž zaznamenávána do binárního souboru, aby se pomocí čtečky daly později analyzovat.



Obr. 50 Čelní panel čtečky dat pro testy z oblasti WR regulace přes PWM

Následují výsledky provedeného testu

### Zadané parametry pro test:

Tab. 18 Sekvence stavů (záporný proud – představuje dodávku energie, kladný proud – představuje odběr energie z distribuční soustavy)

stav	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
doba trvání (s)	60	60	60	60	60	60	60	60	60
1. fáze (A)	-0,5	-0,7	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-4	-7
2. fáze (A)	-0,5	-0,7	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-4	-7
3. fáze (A)	-0,5	-0,7	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-4	-7

Tab. 19 Velikost spotřeby proudu virtuálních zátěží spínaných jednotlivými PWM výstupy WR přes SSR

	SSR1	SSR2	SSR3
I zátěže (A)	3	6	9

Velikost odporu vedení 2  $\Omega$ .

### Výstupní hodnoty testu, součet všech tří fází

**Energie podle zadání** (bez použití WR, stanoveno početně) – dodávka = 255 Wh, odběr = 0 Wh

**Energie skutečná** (s použitím WR, naměřeno) – dodávka = 39 Wh, odběr = 2 Wh

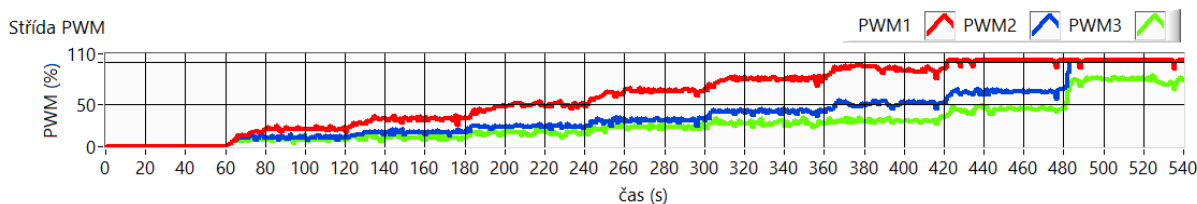
**Energie naměřená elektroměrem** – dodávka = 39 Wh, odběr = 2 Wh

Výsledek z konečných hodnot testování:

Vlivem regulace WR nebylo do distribuční sítě dodána celá energie 255 Wh vyrobená FVE, ale pouze 39 Wh. Rozdíl 216 Wh byl spotřebován při napájení akumulčních spotřebičů řízených PWM výstupy WR. Vlivem nedokonalosti regulace (např. časové prodlevy WR na změny podmínek v domácí síti) spotřebiče ovládané WR spotřebovaly 2 Wh energie z distribuční soustavy. Hodnota této energie je dána rozdílem energie odběru podle zadání (vypočítané na základě tabulky stavů v zadání testu, viz. tab. 16), která činí 0 Wh a energie skutečného odběru, která činí 2 Wh.

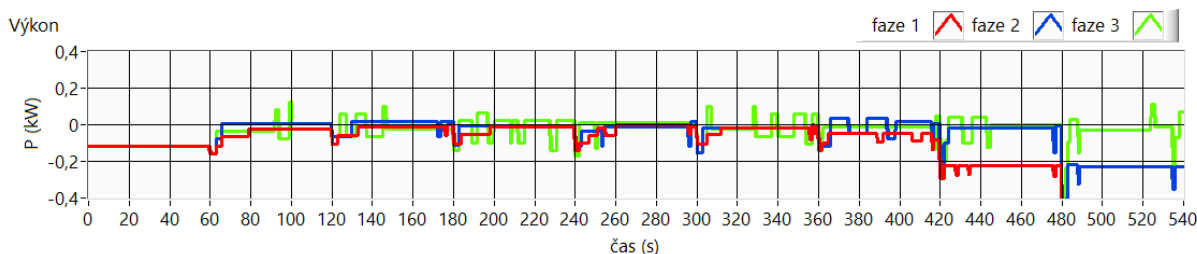
Údaj o energii, kterou naměřil EM4 je zde spíše jen pro kontrolu. Tato úloha neprováděla rychlé střídání mezi dodávkou a odběrem jako v případě kap. 6.3. V této úloze byla velikost proudu měněna v rámci středních hodnot za časový interval 1 s. Nedocházelo ke změnám toku výkonu v rámci času 1 s. proto hodnoty energie naměřené EM4 odpovídají skutečnosti. Nedokonalost ve formě  $T_w$  zde neměla význam.

### Grafy



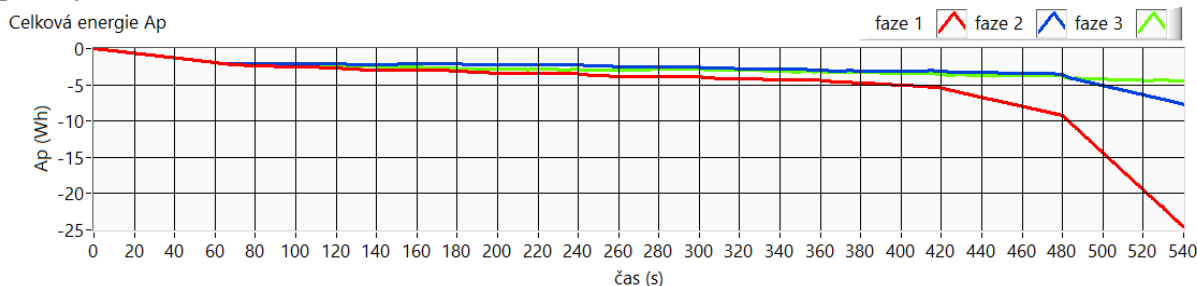
Obr. 51 Průběh střídání PWM výstupů, které řídí spínání zátěží, každé PWM reguluje výkon ve své fázi

Průběhy v obr. 51 zachycují nárůst střídání spínání při zvyšování produkce energie FVE. V předposledním 8. stavu (420s až 480s) dosáhla střída PWM pro řízení zátěže na fázi L1 hodnoty 100% (červená). V posledním 9. stavu (480 s až 540 s) dosáhla i střída PWM pro řízení zátěže na fázi L2 hodnoty 100% (modrá).

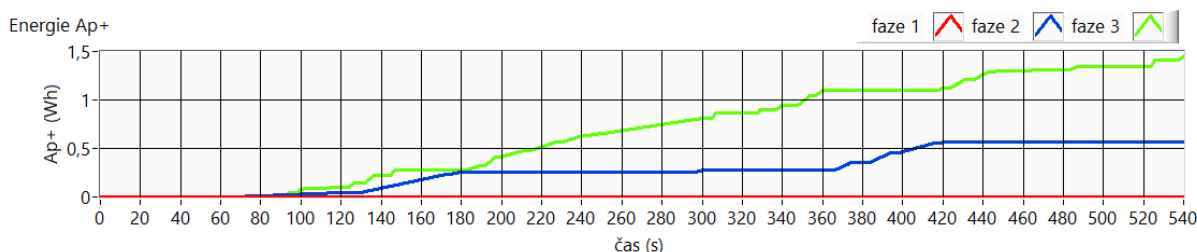


Obr. 52 Průběh výkonu v dané fázi v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného  $U$  a  $I$  v každé fázi)

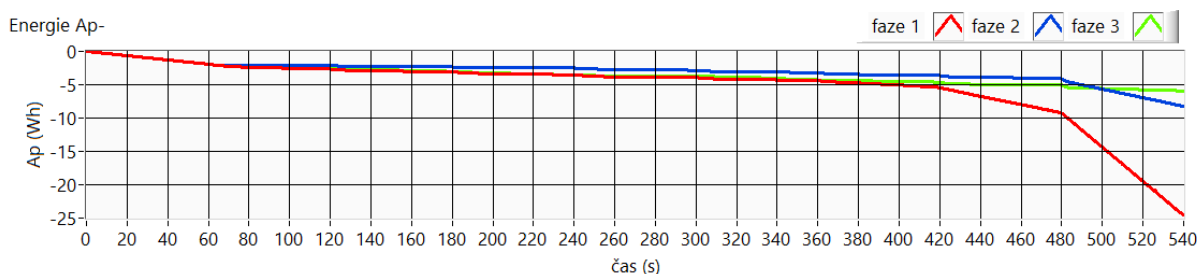
Při porovnání průběhů výkonů na obr. 52 s průběhy v předchozím testu na obr. 44 je zřejmé, že regulace v tomto případě probíhala s mnohem menšími odchylkami od nulové hodnoty toku výkonů přes EM. Regulace při využití PWM výstupů WR pro řízení zátěží přes SSR je tedy mnohem přesnější.



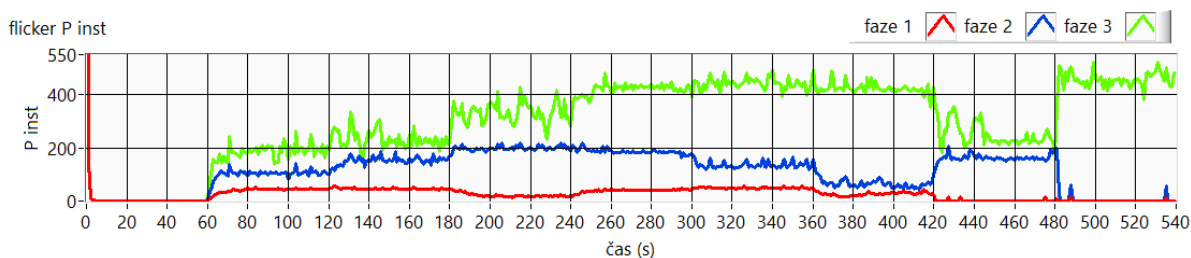
**Obr. 53** Průběh celkové energie v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného  $P$ ; odebíraná energie se přičítá, dodávaná energie do distribuční sítě se odečítá)



**Obr. 54** Průběh energie odebírané z distribuční soustavy v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného  $P$ , poslední hodnota by měla odpovídat údajům  $A_{P+}$  naměřenému EM)



**Obr. 55** Průběh energie dodávané do distribuční soustavy v závislosti na čase (vypočítané hodnoty na základě generovaného  $P$ , poslední hodnota by měla odpovídat údajům  $A_{P-}$  naměřenému EM)



**Obr. 56** Průběh okamžitého flikru v domácnosti v závislosti na čase

Flickr nebyl přímo měřen v testovacím obvodu. Na základě měřených stříd spínání PWM byl simulován průběh napětí ovlivněný spínáním, který byl následně přiváděn do měřiče flikru naprogramovaného v aplikaci.



Z průběhů okamžitého flickru v obr. 56 je zřejmé, že nejmenší flickr byl na fázi L1, kde byla spínaná zátěž s nejmenším příkonem. Největší flickr naopak byl zaznamenán na fázi L3 se zátěží s největším příkonem.

Ze získaných výsledků vyplývá, že je lepší regulovat menší zátěž výstupem PWM v rozsahu střídavy (0 - 100)%, než regulovat větší zátěž v menším rozsahu střídavy. K tomu můžeme i využít relé výstupy na daných fázích, které spínají v okamžiku, kdy střída PWM dosáhne hodnoty 100% a není již tedy dál možné provádět regulaci.

Z hlediska velikosti flickru je tedy lepší rozložit zátěž rovnoměrně po menších částech mezi výstupy PWM a relé výstupy. Výrobce GreenBona k tomu dodává [6]:

„Flickr můžeme účinně omezit pouze omezením výkonu pulsně řízeného spotřebiče. Proto je velmi špatným řešením použít jediný velký spotřebič a spoléhat na to, že pulsní regulace si s tím poradí. Nejúčinnějším řešením je rozložit spotřebu přebytků do většího počtu menších spotřebičů. Ideálně rozpočítat celkový výkon FVE na celkový počet regulačních stupňů regulátoru a na každý regulační stupeň připojit jeden malý spotřebič.“

### 7.3 Simulovaný test vlivu WR na flickr v síti

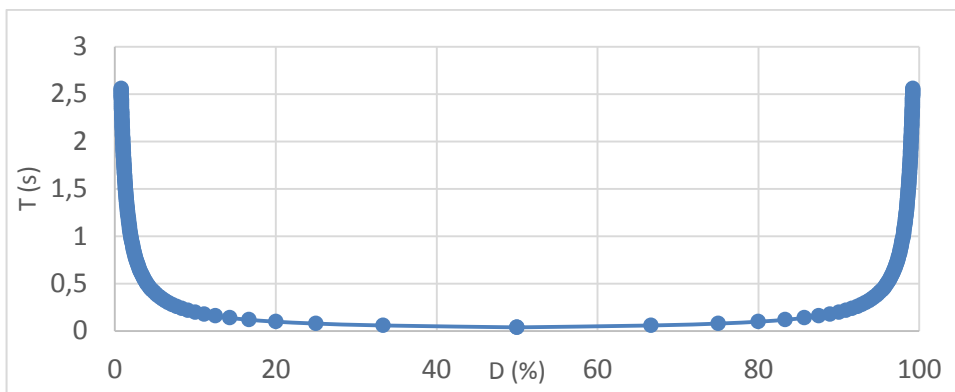
Na základě předešlých testů bylo podrobně zjištěno chování WR během různých stavů v domácí síti. S využitím těchto poznatků byl vytvořen simulační program v LabVIEW, který měl za úkol vyhodnotit vliv spínání zátěží na flickr v síti. S použitím poznatků z kapitoly 7.1 je možné dojít k závěru, jakým způsobem vyjádřit všechny možné stavy regulace WR. Nyní bude pozornost věnována regulaci realizované přes PWM výstupy, protože ty se na flickru s hlediska četnosti spínání projevují mnohem víc než relé výstupy.

U výstupů s PWM signálem pro řízení SSR byly testováním zjištěny potřebné parametry (viz kap. 7.1):

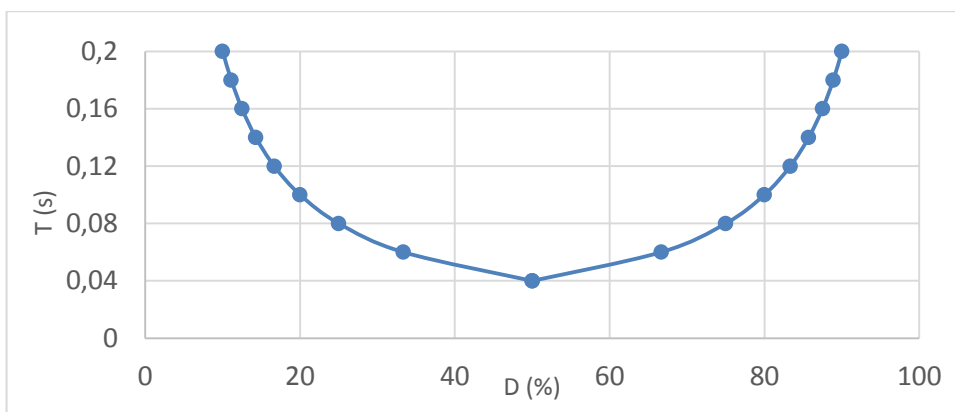
- Rozsah střídavy PWM: 0,78% až 99,22%
- Maximální perioda  $T_{MAX} = 2,56$  s (doba 128 period síťového napětí)
- Minimální perioda  $T_{MIN} = 40$  ms (doba 2 period síťového napětí)
- Maximální doba stavu (zapnuto nebo vypnuto)  $t_{S\_MAX} = 2,54$  s
- Minimální doba stavu (zapnuto nebo vypnuto)  $t_{S\_MIN} = 20$  ms

Závislost mezi střídou a periodou PWM je pro větší přehlednost znázorněn v následujících grafech.

Pro střidu (0-50)% je  $t_{ON} = 20$  ms a mění se  $t_{OFF}$ . Pro střidu od 50-100 je  $t_{OFF} = 20$  ms a mění se  $t_{ON}$ .

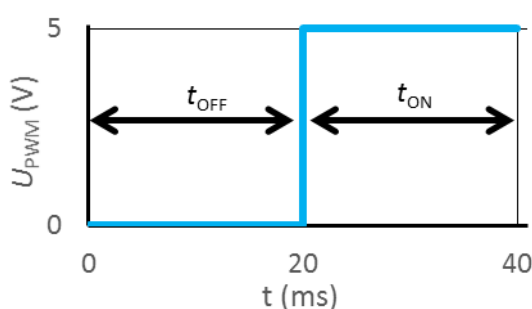


Obr. 57 Závislost periody na střídě



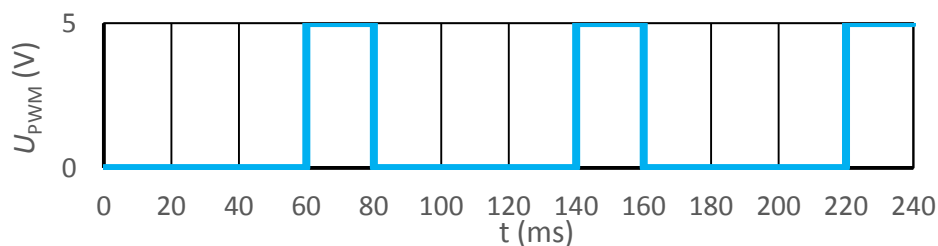
Obr. 58 Závislost periody na střídě detail

Čas, po který je spínací signál z PWM výstupu nulový, je označen jako  $t_{OFF}$ . Čas, po který je spínací signál z PWM výstupu v úrovni 5 V (představuje sepnutí zátěže), je označen jako  $t_{ON}$ . Situaci s generováním spínacího PWM signálu znázorňuje následující obrázek.



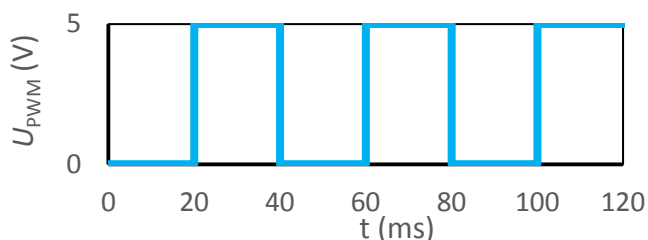
Obr. 59 Signál z PWM výstupu WR s vyznačením časů  $t_{ON}$  a  $t_{OFF}$

V případě že je PI regulátor (ve vizualizaci od výrobce) na hodnotě 0% je na PWM výstupu nulový signál. V okamžiku nárůstu na 1% začne být generován signál s časem zapnutí po dobu jedné periody síťového napětí  $t_{ON} = 20$  ms a signál s časem vypnutí po dobu 127 period síťového napětí  $t_{OFF} = 2,54$  s. S rostoucí integrovanou energií v PI regulátoru (v případě stále přetékajícího výkonu z elektrárny do distribuční soustavy) roste i střída PWM signálu a to tím způsobem, že se zkracuje doba  $t_{OFF}$ . Průběh spínacího signálu v případě kdy střída dosáhne hodnoty 25% je na následujícím obrázku.



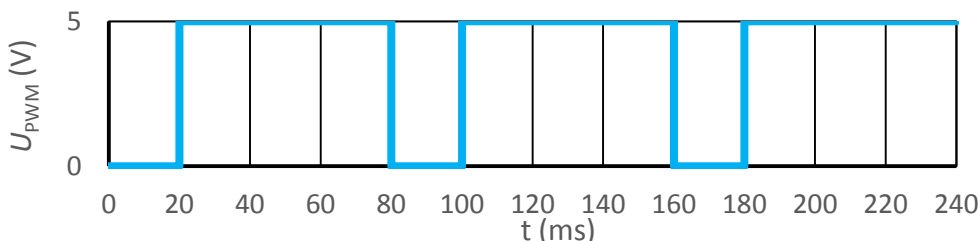
Obr. 60 Signál z PWM výstupu WR, střída je 25%,  $T = 80$  ms

Minimální periody dosahuje PWM signál v okamžiku, kdy je PI regulátor na 50% a tedy i střída je 50%. Nyní jsou si časy vypnutí a zapnutí rovny:  $t_{ON} = t_{OFF} = 20$  ms. Tento stav je na následujícím obrázku.



Obr. 61 Signál z PWM výstupu WR, střída je 50%,  $T = 40$  ms

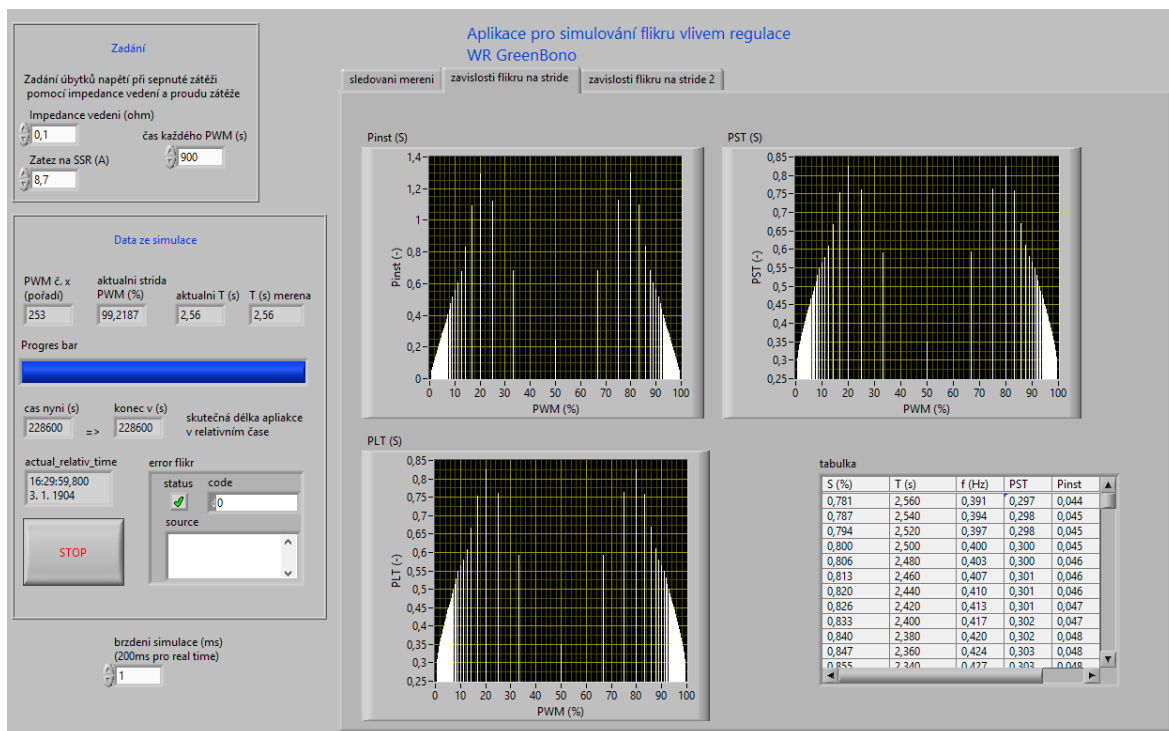
Při dalším nárůstu střídě se začne prodlužovat doba  $t_{ON}$ , čas  $t_{OFF}$  zůstává na hodnotě 20 ms. Průběh spínacího signálu v případě kdy střída dosáhne hodnoty 25% je na následujícím obrázku.



Obr. 62 Signál z PWM výstupu WR, střída je 75%,  $T = 80$  ms

Bude-li střída dále růst, bude se prodlužovat čas zapnutí  $t_{ON}$  až na hodnotu 2,54 s v případě, že PI regulátor bude na hodnotě 99%. Čas  $t_{OFF}$  má stále hodnotu 20 ms. Pokud bude stále výkon přetékat z FVE do distribuční soustavy, generování PWM se zastaví a SSR bude trvale sepnut. V případě trvání saturace po stanovený čas se dále spínají relé příslušné fáze.

Podle tohoto chování byl sestaven softwarový model, který modeluje všechny možné periody spínání WR na výstupech PWM. Perioda se pohybuje v rozmezí hodnot  $T_{MIN} = 40$  ms až  $T_{MAX} = 2,56$  s. Střída se mění v rozmezí 0,78% až 99,22%. Pro každou střidu je provedeno modelování fluktuace napájecího napětí po stanovený časový interval. Data obsahující průběh napětí zatížený flikrem jsou předávány do flikrmetru, který na jejich základě stanoví hodnotu krátkodobého flikru  $P_{st}$  a okamžitého flikru  $p(t)$ . Výsledkem je graf znázorňující závislost měřeného flikru na střídě spínání.



Obr. 63 Část čelního panelu aplikace

Do aplikace se zadávají tři vstupní parametry: Zkratová impedance  $Z_K (\Omega)$ , velikost proudového odběru virtuální zátěže připojené na PWM výstup přes SSR  $I_Z (A)$  a čas trvání každé jednotlivé střidy PWM (s) z důvodu aby model dokázal vypočítat flickr Pst, který je k dispozici až po deseti minutách. Zátěž je charakterizována odebíraným proudem a ne výkonem z toho důvodu, aby byla aplikace snadněji pochopitelná. V praxi se u zátěže udává odebíraný výkon, ale z toho lze odebíraný proud snadno stanovit jako podíl výkonu k napájecímu napětí 230 V.

Následující vzorce naznačují princip výpočtu parametrů potřebných pro stanovení velikosti flickru. Střída

$$D = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{0,02}{0,02 + 0,02} = 0,5 \quad (24)$$

Aby platilo, že střední hodnota energie v rámci každé periody je nulová, musí zároveň platit následující vztahy

$$A_{P+} = A_{P-} \quad (25)$$

$$P_{DS} \cdot t_{ON} = P_{FVE} \cdot t_{OFF} \quad (26)$$

$$(P_Z - P_{FVE}) \cdot t_{ON} = P_{FVE} \cdot t_{OFF} \quad (27)$$

Poměr doby, po kterou je spotřebič zapnut  $t_{ON}$  k době, po kterou je vypnut  $t_{OFF}$ , odpovídá poměru vyráběného výkonu FVE  $P_{FVE}$  k výkonu odebíranému z distribuční soustavy po dobu zapnutí spotřebiče. Výkon odebíraný z distribuční soustavy  $P_{DS}$  lze určit odečtením výkonu FVE  $P_{FVE}$  od příkonu zátěže  $P_Z$ . Tuto skutečnost vyjadřuje následující vztah.

$$\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} = \frac{P_{FVE}}{P_{DS}} = \frac{P_{FVE}}{P_Z - P_{FVE}} \quad (28)$$

Protože napětí je pro všechny výkony stejné, můžeme tento vztah upravit do podoby s proudy

$$\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} = \frac{I_{FVE}}{I_{DS}} = \frac{I_{FVE}}{I_Z - I_{FVE}} \quad (29)$$

Matematickými úpravami tohoto vztahu lze dojít ke vztahu pro výpočet velikosti proudu, který je produkován VFE pro danou střidu

$$\begin{aligned} \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} &= \frac{I_{FVE}}{I_Z - I_{FVE}} \\ \Rightarrow t_{ON} \cdot (I_Z - I_{FVE}) &= I_{FVE} \cdot t_{OFF} \\ \Rightarrow t_{ON} \cdot I_Z - t_{ON} \cdot I_{FVE} &= I_{FVE} \cdot t_{OFF} \\ \Rightarrow I_{FVE} \cdot t_{OFF} + t_{ON} \cdot I_{FVE} &= t_{ON} \cdot I_Z \\ \Rightarrow I_{FVE} &= \frac{t_{ON}}{t_{OFF} + t_{ON}} \cdot I_Z \\ \Rightarrow I_{FVE} &= D \cdot I_Z \quad (A) \end{aligned} \quad (30)$$

Proud odebíraný z distribuční soustavy při sepnuté zátěži

$$I_{DS} = I_Z - I_{FVE} \quad (A) \quad (31)$$

Proud dodávaný do distribuční soustavy při vypnuté zátěži odpovídá proudu  $I_{FVE}$ .

Úbytek napětí na zkratové impedanci při sepnuté zátěži  $U_{V\_ON}$

$$U_{V\_ON} = Z_K \cdot I_{DS} \quad (V) \quad (32)$$

přepětí na zkratové impedanci při vypnuté zátěži vlivem přetékajícího výkonu z FVE  $U_{V\_OFF}$

$$U_{V\_OFF} = Z_K \cdot I_{FVE} \quad (V) \quad (33)$$

Napětí v domácí síti při sepnuté zátěži  $U_{D\_ON}$

$$U_{D\_ON} = U_N - U_{V\_ON} = 230 - U_{V\_ON} \quad (V) \quad (34)$$

Napětí v domácí síti při vypnuté zátěži  $U_{D\_OFF}$

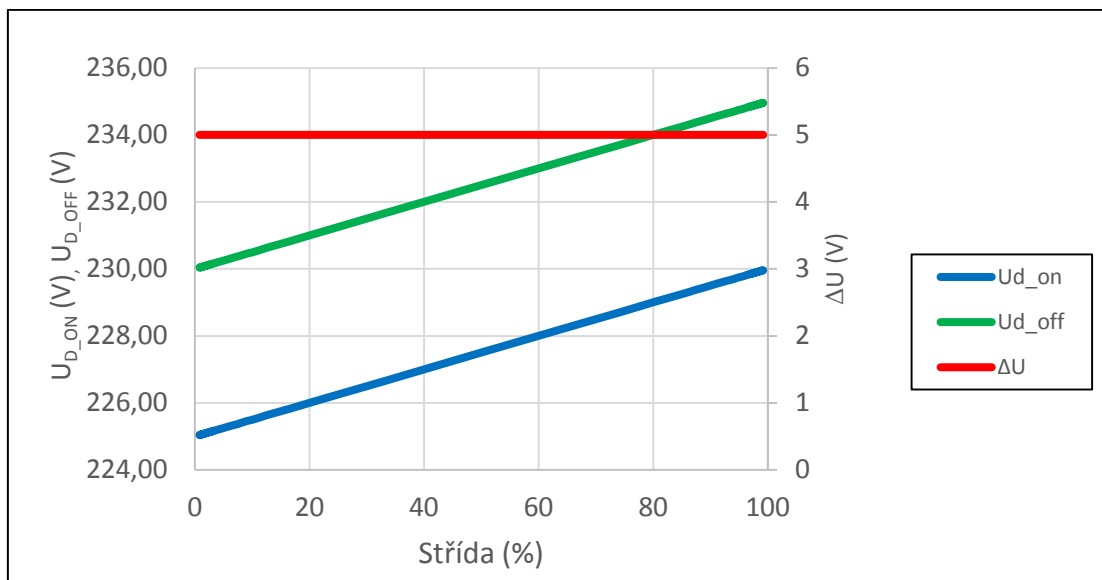
$$U_{D\_OFF} = U_N - U_{V\_OFF} = 230 - U_{V\_OFF} \quad (V) \quad (35)$$

Rozdíl v napětí při zapnuté a vypnuté zátěži. Vyjadřuje hloubku modulace způsobující flikr

$$\Delta U = U_{V\_ON} - U_{V\_OFF} \quad (V) \quad (36)$$

Pomocí výpočtů v programu Excel bylo ověřeno, že  $\Delta U$  neboli hloubka modulace napětí, bude pro všechny střidy vycházet stejně, protože při zvětšování střidy bude lineárně růst přepětí při vypnuté

zátěži a lineárně klesat úbytek napětí při zapnuté zátěže. Proto rozdíl těchto dvou veličin  $\Delta U$  je pořád stejný. To ukazuje následující graf, který byl vytvořen na základě výpočtů z Excelu (je součástí příloh na DVD). Jedná se o případ, kdy zátěží odebírá proud je  $I_Z = 5 \text{ A}$ , a zkratová impedance je  $Z_K = 1 \text{ } \Omega$ . Tento soubor je rovněž obsažen v přílohách.



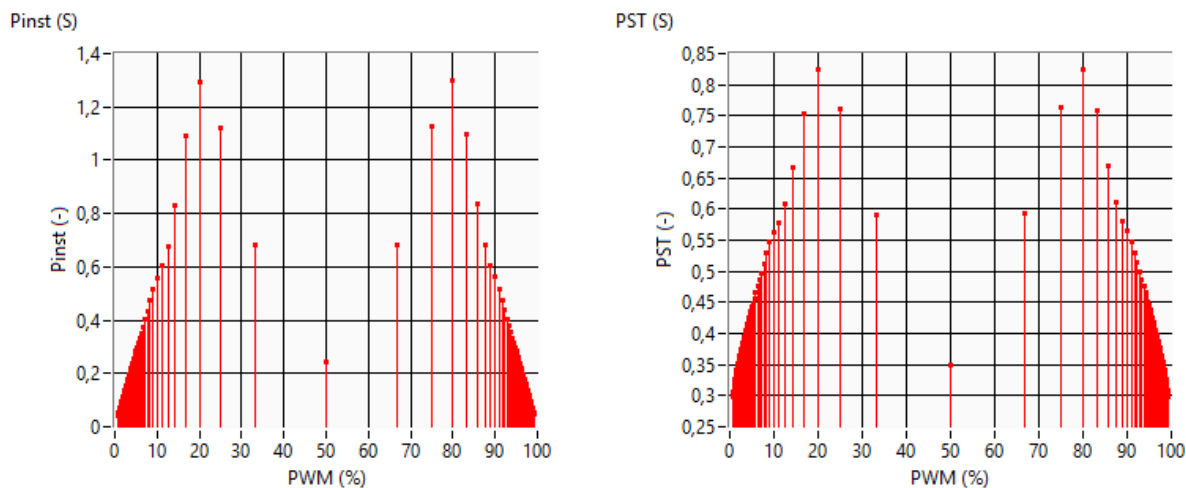
Obr. 64 Závislost  $U_{D\_ON}$ ,  $U_{D\_OFF}$ , a  $\Delta U$  na střídě

### Výsledky provedených testů:

Test č. 1:

Zadané parametry simulace:

$Z_K = 0,1 \text{ } \Omega$ ,  $I_Z = 8,7 \text{ A}$  ( $P_Z = 2 \text{ kW}$ ), doba simulování každé střidy 15 min

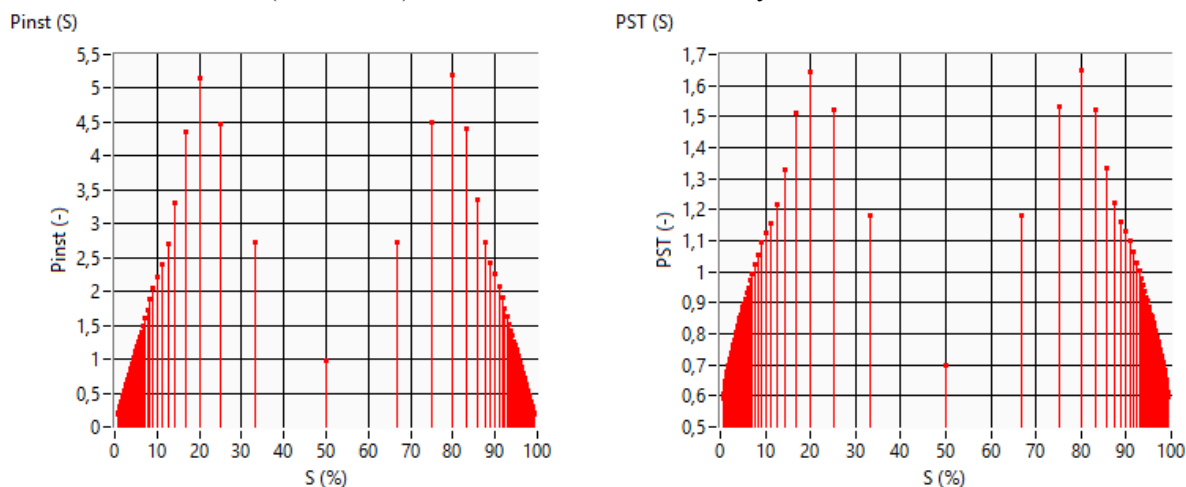


Obr. 65 Závislost flikru na střídě spínání PWM výstupu WR Greenbono,  $Z_K = 0,1 \text{ } \Omega$

Test č. 2:

Zadané parametry simulace:

$Z_K = 0,2 \Omega$ ,  $I_Z = 8,7 \text{ A}$  ( $P_Z = 2 \text{ kW}$ ), doba simulování každé střidy 15 min.

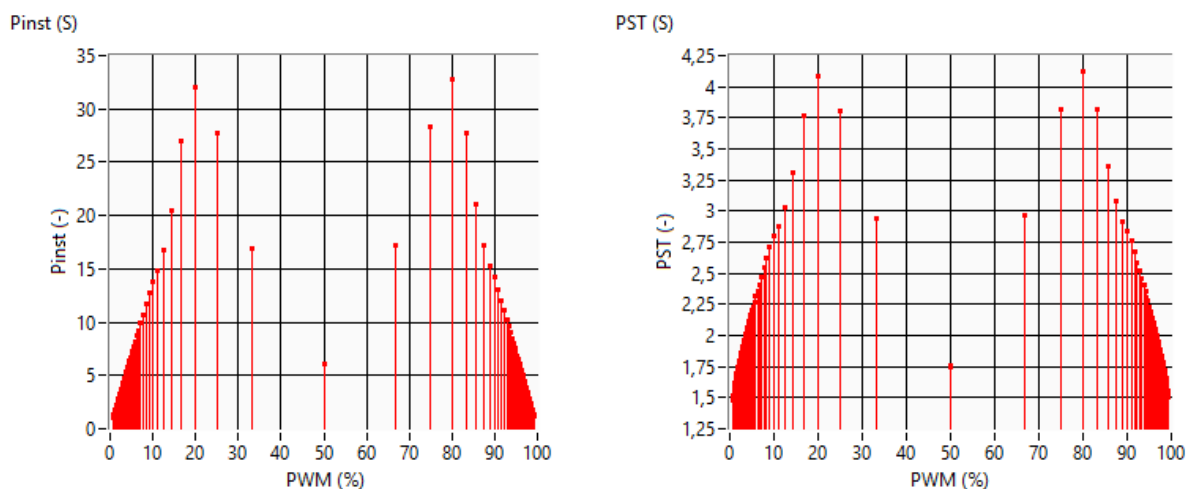


Obr. 66 Závislost flikru na střídě spínání PWM výstupu WR Greenbono,  $Z_K = 0,2 \Omega$

Test č. 3:

Zadané parametry simulace:

$Z_K = 0,5 \Omega$ ,  $I_Z = 8,7 \text{ A}$  ( $P_Z = 2 \text{ kW}$ ), doba simulování každé střidy 15 min.



Obr. 67 Závislost flikru na střídě spínání PWM výstupu WR Greenbono,  $Z_K = 0,5 \Omega$

### Výsledky testování

Z výsledných grafů testů 1 – 3 vyplývá, že tvar průběhu flikru v závislosti na střídě spínání PWM výstupů WR je vždy stejný. Velikost flikru je ovlivněna jen hloubkou modulace napětí, která závisí na velikosti zkratové impedance a proudu odebraném spínanou zátěží.

Největší flikr byl vždy zaznamenán při střídě spínání 20% a 80%. Tyto střidy odpovídají periodě spínání 100 ms. ( $t_{ON} = 20 \text{ ms}$ ,  $t_{OFF} = 80 \text{ ms}$  a naopak). Perioda  $T = 100 \text{ ms}$  odpovídá frekvenci 10 Hz. Přístroje měřící flikr jsou ale nejcitlivější při frekvenci 8,8 Hz podle ČSN EN 61000-4-15 [9]. Nejblíže frekvenci 8,8 Hz byla testovaná frekvence 8,3 Hz, která odpovídala periodě 120 ms při střídě spínání 83,33 a 16,67. Hloubka modulace byla pro všechny střidy konstantní, proto nemohla mít na tento

rozdíl vliv, viz obr. 64. Tato rozlišnost byla z největší pravděpodobností způsobena tím, že střída nebyla pro všechny frekvence konstantní.

Aby bylo ověřeno, že se nejedná o chybu v programu, byl v aplikaci k dispozici graf s průběhem generovaného napětí a numerický indikátor zobrazující právě generovanou střidu a periodu. Pomocí numerického ovladače brždění simulace, bylo možné běh programu zrychlovat nebo zpomalovat. Prostřednictvím těchto prvků bylo zkontrolováno, že při periodách střídání v rozmezí 200 ms až 40 ms byly skutečně generovány správné poklesy v průběhu napětí, který byl přiveden do funkce měřicí flickr.

Z grafů v testech 1 – 3 vyplývá, že při spínání zátěže s příkonem 2 kW, což je běžný příkon bojlerů pro ohřev vody, záleží na velikosti zkratové impedance v místě provozu FVE. V místě se zkratovou impedancí  $0,1 \Omega$  by takovou zátěž bylo možné spínat přes SSR řízené PWM výstupem WR aniž by došlo k překročení limitu  $P_{st} = 1$ , viz obr. 65. V místě se zkratovou impedancí  $0,2 \Omega$  by již ale mohlo docházet k překročení limitu, viz obr. 66.



## Závěr

Z testování vlivu harmonických složek  $U$  a  $I$  na přesnost měření testovaných EM vyplynulo, že vysoký obsah harmonických složek neovlivnil významným způsobem přesnost měření testovaných EM. Relativní chyby měření nepřekročily mez stanovenou třídou přesnosti, kromě jednoho případu, který nastal v testu v kap. 6.1.3 u EM1. EM1 naměřil množství energie s relativní chybou 2,67%, přičemž jeho stanovená třída přesnosti je 2.

Testem pro automatizované ověření délky  $T_w$  elektroměru EM4 byla zjištěna časová délka  $T_w = 1$  s. Při střídání mezi dodávkou energie a odběrem energie z distribuční soustavy, které bylo prováděno s touto periodou, EM naměřil buď nulové, nebo téměř nulové hodnoty dodávky a odběru energie. Samozřejmě muselo být dodrženo, že energie odběru je v rámci periody rovna energii dodávky. Stejného výsledku lze dosáhnout periodou střídání, pro niž je  $T_w$  celočíselným násobkem. To znamená např. periodou střídání: 0,5 s; 0,25 s; 0,2 s; 0,1 s atd.

Test délky  $T_w$  EM by bylo možné provést i bez použití automatizace jen za pomoci modulu pro vytváření sekvencí ze SW balíku Test Universe. Uživatel by musel vytvořit samostatnou testovací sekvenci pro každou testovanou periodu střídání mezi dodávkou a odběrem energie. Sekvenci následně nechat generovat a před testem i po něm by musel ručně vyčítat hodnoty z paměťových registrů, což by bylo velice pracné. Hodnoty testů by musel ručně zadávat do protokolu o měření a při této činnosti by se mohl splést vlivem lidského faktoru.

Aplikace pro automatizované testování délky  $T_w$ , vyvinutá a použitá v této diplomové práci v kap. 6.3, celý proces testování výrazně zjednodušuje. Stačí, aby obsluha připojila testovaný EM, zadala parametry testu a spustila jej. Po skončení testu si jen načte protokol se zaznamenanými výsledky z testování. Výsledkem je časová úspora obsluhy a odstranění lidského faktoru z procesu zaznamenávání naměřených hodnot.

U EM4 byl zjištěn problém s blikáním metrologické LED a impulsními kontakty v případě rychlého střídání odběru energie a dodávky energie. Tento problém byl podrobně popsán v kap. 6.4. V případě rychlého střídání mezi odběrem a dodávkou energie může dojít ke stavu, kdy metrologická LED neblíká a ani na impulzních kontaktech nejsou generovány žádné pulzy, ale přitom EM stále zaznamenává malé kvanta energie do svých paměťových registrů. Tato vlastnost může představovat problém v případě dálkového odečtu energie realizovaného přes tyto výstupy EM. Na základě poznatků z těchto testů byl ve spolupráci s kolegy a vedoucím této práce publikován článek **Energy Meter Results Under Fast Changing Energy Flow Condition**, který je v databázi Web of Science [19].

Testováním WR Greenbono byl popsán princip jeho regulace přebytků energie z FVE. Na vzniku flikru se kontaktní výstupy relé WR projevují zanedbatelně, protože jsou spínány na delší časové intervaly. Větší problém z hlediska vzniku flikru představují PWM výstupy, které řídí spínání zátěží přes SSR. Průběh okamžitého flikru z porovnávacího testu v kap. 7.2.2 potvrdil, že je lepší rozložit regulaci do více spotřebičů s menším příkonem, než řešit regulaci spínáním jednoho velkého spotřebiče.

Z hodnot získaných ze simulovaného testu flikru v kap. 7.3 vyplynulo, že největší flikr vzniká při spínání se střídou 20% a 80%, tedy při periodě spínání  $T = 100$  ms ( $t_{ON} = 20$  ms,  $t_{OFF} = 80$  ms a naopak). Simulace byla prováděna pro spínanou zátěž s proudovým odběrem 7,8 A, což odpovídá příkonu 2 kW. V případě, že zkratová impedance byla 0,2  $\Omega$  přesahovaly hodnoty  $P_{st}$  při některých

střídách stanovenou mez  $P_{st} = 1$ . viz obr. 66. V případě, že zkratová impedance byla  $0,5 \Omega$  přesahovaly hodnoty  $P_{st}$  pro všechny střidy stanovenou mez 1. viz obr. 67.

Největší flickr byl v testech v kap. 7.3 stanoven vždy při periodě spínání 100 ms, která odpovídá frekvenci 10 Hz a ne při očekávané frekvenci 8,3 Hz, která byla nejbližší nejcitlivější frekvenci přístrojů měřících flickr 8,8 Hz. Tento rozdíl byl nejspíše způsoben tím, že střída nebyla konstantní. Jako další vývoj v této oblasti testování by bylo vhodné provést testy, jež by proměřily závislost flickru na střídě modulace napětí, při konstantní frekvenci.

## Literatura

- [1] MACHÁČEK, Václav. *Elektrické přípojky z vedení distribučních soustav a připojování zákazníků*. Vyd. 1. Praha: IN-EL, 2010. Elektro (IN-EL). ISBN 978-80-86230-49-8.
- [2] The History of The Electricity Meter. *Metering & Smart Energy International* [online]. 2006 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.metering.com/the-history-of-the-electricity-meter/>
- [3] Dotace na fotovoltaiiku: Garantovaná výkupní cena solární elektřiny. *Fotovoltaiika: Průvodce světem fotovoltaiických panelů a solárních systémů* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.fotovoltaiika-panely.com/dotace-fotovoltaiika-vykupni-cena/>
- [4] Dotace na fotovoltaiiku: Zelený bonus. *Fotovoltaiika: Průvodce světem fotovoltaiických panelů a solárních systémů* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.fotovoltaiika-panely.com/dotace-fotovoltaiika-zeleny-bonus/>
- [5] Regulátory WATTRouter: Základní popis funkce. *SOLAR controls* [online]. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: [http://www.solarcontrols.cz/cz/watrouter\\_function.html](http://www.solarcontrols.cz/cz/watrouter_function.html)
- [6] Greenbono . *YORIX s.r.o.* [online]. 2010 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.yorix.cz/cz/greenbono/greenbono.htm>
- [7] IEEE STD 519-1992. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. 2. vyd. 2004.
- [8] POWER QUALITY AND ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. *CIRRED: International Conference on Electricity Distribution*. Stockholm, 2013, **22**. Dostupné také z: <http://www.cired2013.org/>
- [9] ČSN EN 61000-4-15. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4: Zkušební a měřicí technika – Oddíl 15: Měřič blikání – Specifikace funkce a dimenzování*. Český normalizační institut, 1999.
- [10] ZEMAN, Jindřich, Petr SVĚCHOTA a Igor ŠLÉGR. *Postup pro ověřování elektroměrů*. PO 01-2013.
- [11] ČSN EN 62053-22. *Vybavení pro měření elektrické energie (AC) – Zvláštní požadavky Část 22: Střídavé statické činné elektroměry (třídy 0,2 S a 0,5 S)*. Český normalizační institut, 2003.
- [12] OMICRON ELECTRONICS. *CMC 256plus: The High Precision Relay Test Set and Universal Calibrator* [online]. 2013 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: [https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user\\_upload/pdf/literature/CMC-256plus-Brochure-ENU.pdf](https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/literature/CMC-256plus-Brochure-ENU.pdf)
- [13] OMICRON ELECTRONICS. *CM-Line Catalog: The High Precision Relay Test Set and Universal Calibrator* [online]. OMICRON electronics, 2013 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: [https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user\\_upload/pdf/literature/CM-Line-Catalog-ENU.pdf](https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/literature/CM-Line-Catalog-ENU.pdf)
- [14] WITTASSEK, Tomáš. *Virtuální instrumentace I*. Ostrava, 2012. Učební text. VŠB - TU Ostrava.
- [15] BRUNCLÍK, Dalibor. *Analýzátor elektrického výkonu pro nesinusové průběhy napětí a proudu*. 2014. Bakalářská práce. VŠB - TU Ostrava. Vedoucí práce Petr Bilík.
- [16] BILÍK, Petr a kolektiv autorů. *Systémy pro měření a sběr dat*. Ostrava, 2012. Učební text. VŠB - TU Ostrava.

- [17] Instrument driver network: Omicron CMC 256plus. *National Instruments* [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z:  
[http://sine.ni.com/apps/utf8/niid\\_web\\_display.model\\_page?p\\_model\\_id=19083](http://sine.ni.com/apps/utf8/niid_web_display.model_page?p_model_id=19083)
- [18] OMICRON ELECTRONICS. *CMEngine*. 2012.
- [19] BILÍK, Petr. Energy Meter Results Under Fast Changing Energy Flow Condition. *Web of Science*. 2015. DOI: ISBN: 978-80-553-2187-5.
- [20] NOVOTNÝ, Michal. Komunikace s elektroměry dle normy ČSN EN 62056-21. *AMiT* [online]. 2010 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z:  
[http://www.amit.cz/support/cz/aplikacni\\_poznamky/ap0039\\_cz\\_01.pdf](http://www.amit.cz/support/cz/aplikacni_poznamky/ap0039_cz_01.pdf)
- [21] CVEK, Martin. *Automatizované odečty fakturačních elektroměrů*. 2012. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ondřej Nývlt.
- [22] Soubory ke stažení. *YORIX s.r.o.* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z:  
<http://www.yorix.cz/cz/download/download.htm>

## Seznam příloh

Součástí této diplomové práce je DVD s následujícím obsahem:

Adresář **programy\_LabVIEW** obsahuje čtyři podadresáře s následujícím obsahem

1. **Greenbono\_rele** – obsahuje projekt, který shromažďuje kódy pro aplikaci testování regulace WR přes relé výstupy K1 až K5, hlavním programem je **main**. Obsahuje také čtečku naměřených dat.
2. **Greenbono\_PWM\_flikr** – obsahuje projekt, který shromažďuje kódy pro aplikaci testování regulace WR přes PWM výstupy, hlavním programem je **main**. Obsahuje také čtečku naměřených dat, program pro simulaci flikru **SSR\_simulace\_flicker** použitý v kap. 7.3 a program **SSR\_simple**, který byl použit v kap. 7.1.
3. **Mereni\_Tw\_elektromeru** - obsahuje projekt, který shromažďuje kódy pro aplikaci testování délky časového okna Tw elektroměru, hlavním programem je **main**.
4. **Simulator\_EM** – obsahuje program **EM-vr-01**, který byl použit pro simulování chování elektroměru při rychlém střídání dodávky a odběru energie

Adresář **soubory\_Excel** obsahuje soubory

1. **Zavislost\_T\_na\_s**, který obsahuje data se všemi střídami simulovanými v testu v kap. 7.3 a grafem závislosti periody spínání na střídě
2. **flikr\_vypocet\_hloubky\_modulace**, který obsahuje data a graf pro výpočty provedené v kap. 7.3 z oblasti hloubky modulace napětí při simulovaném flikru.

Adresář **text\_DP** obsahuje tuto diplomovou práci ve formátu docx a pdf.